

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

В.В. Лянденбургский, А.П. Иншаков, И.И. Курбаков

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ТУРБОКОМПРЕССОРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ
МОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

Пенза 2015

УДК 629.113.003.67

ББК 39.33–08

Л26

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация безопасности движения» И.Е. Ильина (ПГУАС); кандидат технических наук, доцент кафедры «Технический сервис машин» А.С. Иванов (ПГСХА)

Лянденбургский В.В.

Л97 Совершенствование диагностирования турбокомпрессоров двигателей мобильной техники: моногр. / В.В. Лянденбургский, А.П. Иншаков, И.И. Курбаков. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 196 с.
ISBN 978-5-9282-1322-0

Приведен подробный анализ существующего оборудования для диагностирования автомобилей. Предложен новый подход к регистрации неисправностей и удешевлению предлагаемого оборудования для диагностирования турбокомпрессоров двигателей мобильной техники.

Монография предназначена для широкого круга специалистов, научных работников, преподавателей и аспирантов.

ISBN 978-5-9282-1322-0

© Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2015

© Лянденбургский В.В., Иншаков А.П., Курбаков И.И., 2015

ВВЕДЕНИЕ

Концепция развития современной мобильной техники предполагает увеличение мощности их двигателей при снижении расходов топлива и выбросов в атмосферу продуктов сгорания. Для достижения поставленных целей автотракторные двигатели оснащаются турбокомпрессорами (ТКР), охладителями наддувочного воздуха, аккумуляторными системами топливоподачи, электронными элементами управления и встроенными системами самодиагностики.

Система газотурбинного наддува (ГТН) автотракторных дизелей в классическом её конструктивном исполнении состоит из двигателя, турбины и компрессора. Между турбиной и компрессором имеет место механическая связь, а между турбиной и двигателем – газовая. При относительно простой конструктивной схеме и несложном принципе действия ТКР, определение его технического состояния в процессе эксплуатации представляет собой непростую задачу. Неисправности в любом из элементов, постепенно развивающиеся в процессе эксплуатации и внешне заметно не проявляющиеся, на определенных режимах работы могут привести к отказу турбокомпрессора, либо двигателя в целом.

Сложность диагностирования турбокомпрессора определяется многими причинами. Во-первых, показатели эффективности функционирования ТКР в эксплуатации зависят как от технических и режимных характеристик двигателя, так и самого турбокомпрессора. Во-вторых, до сих пор фактически отсутствуют надежные инструментальные средства контроля технического состояния турбокомпрессора в эксплуатации. Определение наиболее информативных функциональных параметров турбокомпрессора, установление их предельных значений, разработка методов и средств их контроля является первостепенным при техническом сервисе двигателей мобильной техники.

Монография представляет собой систематическое изложение по совершенствованию встроенных средств диагностирования турбокомпрессоров двигателей мобильной техники.

Авторы выражают свою признательность работникам РИО за помощь в подготовке монографии к изданию.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1. Конструктивные особенности и условия формирования характеристик турбокомпрессоров в условиях эксплуатации

Турбокомпрессор в системе газотурбинного наддува автотракторных двигателей состоит из ротора (рис. 1.1) – вала с колесами турбины и компрессора, подшипников, уплотнений и корпусных деталей. Для вращения турбины используется энергия отработавших газов, воздействующих на ее лопатки. Как правило, ротор устанавливается в подшипниках скольжения специальной «плавающей» конструкции – бронзовая втулка имеет зазор по валу и в корпусе [154].

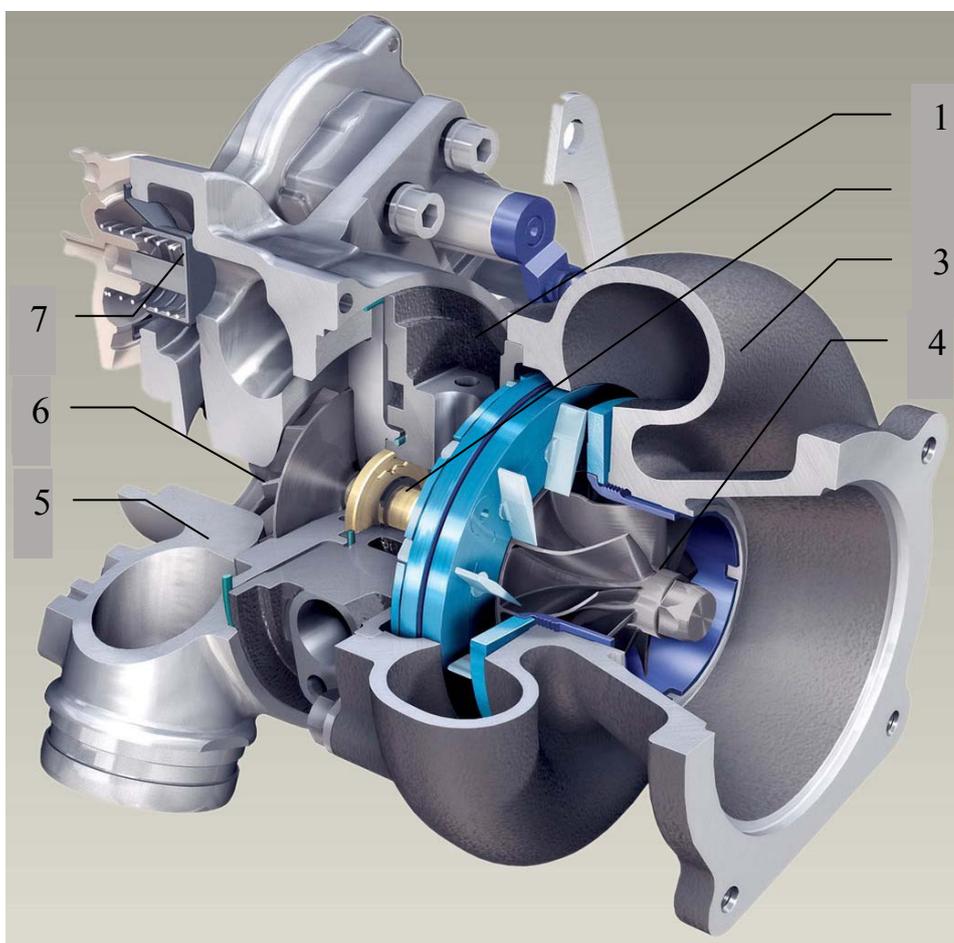


Рис. 1.1. Схема классического турбокомпрессора в разрезе:
1 – корпус ТКР; 2 – вал с подшипниковым узлом; 3 – корпус турбины;
4 – турбинное колесо; 5 – корпус компрессора; 6 – компрессорное колесо;
7 – элемент системы управления ТКР

Каждый зазор составляет величину в несколько сотых долей миллиметра. При этом втулка вращается со скоростью, меньшей, чем вал, обеспечивая тем самым работоспособность подшипника при высоких скоростях

вращения. Смазка узлов трения осуществляется моторным маслом, поступающим из двигателя, а герметизация вала обеспечивается торцевыми уплотнениями специальной конструкции. В корпусе турбокомпрессора предусмотрены каналы подвода и слива масла, а у некоторых дизелей – еще и каналы для жидкостного охлаждения [183].

Высокий скоростной режим работы турбокомпрессоров значительно ужесточает условия работы, как самого ротора, так и контактирующих с ним деталей.

Рабочие колеса турбокомпрессоров подвергаются действию центробежных сил и пульсирующего давления газов. Под действием переменных усилий возникают вибрации диска и лопаток [11, 154].

В наиболее тяжелых условиях работает колесо турбины, испытывающее действие высоких нестабильных температур и скачков давления. Температура газов перед турбиной при длительной работе достигает 700 °С, температура корпусных деталей достигает 107...147 °С со стороны компрессора и 670...720 °С со стороны турбины [154].

Конструкции турбокомпрессоров постоянно совершенствуются. Работой по доработке турбокомпрессоров занимаются такие зарубежные фирмы, как Borg Warner Turbo Systems, Honeywell Turbo Technologies, Mitsubishi, Holset и др. [165]. На сегодняшний день известны следующие решения:

- снижение массы турбины за счет применения новых материалов;
- применения новых конструкций подшипниковых узлов;
- применение перепускных клапанов;
- применение соплового аппарата с изменяемой геометрией;
- применение отдельных конструкций.

Но до настоящего времени слабыми звеньями ТКР остаются сопряжения «вал ротора – подшипник» и «наружная поверхность подшипника – отверстие корпуса», надежная работа которых обуславливает как ресурс всей системы наддува, так и правильность функционирования самого ТКР в условиях эксплуатации [161].

Наиболее распространенной моделью турбокомпрессора, устанавливаемой на отечественные двигатели мобильной техники, является турбокомпрессор марки ТКР 6.1.

Ротор турбокомпрессора ТКР 6.1, установленный на двигателе, Д-245-35 раскручивается в номинальном режиме работы двигателя по частоте вращения свыше 100000 об/мин, что обеспечивает повышение давления всасываемого воздуха до 150-160 кПа (степень повышения давления наддува $P_k=1,5-1,6$).

Согласно ГОСТ Р 53637-2009 «ТУРБОКОМПРЕССОРЫ АВТОТРАКТОРНЫЕ. Общие технические требования и методы испытаний» [32],

основными характеристиками работы ТКР и определяемые при испытаниях являются:

- для компрессора – зависимость степени повышения давления в компрессоре P_k и эффективного КПД η_k от приведенного расхода $G_{k пр}$
- для турбины – зависимость приведенного расхода газа $G_{т пр}$ и эффективного КПД η_t от степени понижения давления в турбине
- для ТКР, снабженных перепускными клапанами или устройствами, регулирующими пропускную способность турбины, определяют давление воздуха за компрессором, соответствующее началу открытия клапана или регулирующего устройства.

Данные характеристики турбокомпрессоров получают методом испытаний на специальных стендах. В эксплуатационных условиях получить указанные характеристики для оценки работоспособности ТКР проблематично, так как скоростной режим турбокомпрессора не отличается стабильностью по различным причинам.

Снижение частоты вращения зачастую указывает на наличие неисправностей [151]. Фактором снижения частоты вращения ротора турбокомпрессора в эксплуатации служат нарушения в системе воздухообеспечения и наличие дополнительных механических потерь вследствие трения вращающихся частей ротора о неподвижные детали ТКР [18]. Результатом может быть износ представленный на (рис. 1.2, 1.4).

Такое явление наблюдается в практике при увеличенном осевом перемещении ротора, а также вследствие отложения смолистых нагарообразований на рабочих деталях турбокомпрессора, имеющим место при нарушении теплового режима работы двигателя.



Рис. 1.2. Износ турбинного колеса в результате трения о неподвижные части ТКР



Рис. 1.3. Обрыв лопатки вследствие попадания постороннего предмета



Рис. 1.4. Механический износ на валу турбокомпрессора

На недопустимое нарушение теплового состояния двигателя в эксплуатации указывают большое число исследователей [68, 69, 76].

Отклонение скоростного режима ТКР от номинального в сторону уменьшения приводит в механических системах топливоподачи к снижению коэффициента избытка воздуха, а, следовательно, и росту теплонапряженности двигателя [90]. Повышенная теплонапряженность является следствием разрушения элементов двигателя. Элементы клапана, попадая на турбинное колесо, вызывают повреждения ТКР (рис 1.3). Нарушение в системе очистки воздуха также являются следствием серьезных повреждений турбокомпрессора (рис 1.5) [44].



Рис. 1.5. Разрушение компрессорного колеса в результате попадания постороннего предмета

На переходных режимах особенностью работы двигателей с ГТН является несоответствие воздухообеспечения цикловым подачам топлива, приводящее к снижению коэффициента избытка воздуха. Нарушение рабочего процесса двигателя при этом возникает не только за счет инерционности ротора ТКР, вызывающей запаздывание подачи воздуха, но и за счет характеристики механического регулятора, осуществляющего подачу топлива независимо от подачи воздуха [74]. Указанные особенности системы воздухообеспечения двигателей с турбонаддувом приводят в условиях эксплуатации к существенному отклонению коэффициента избытка воздуха от оптимального значения, а, следовательно, к снижению топливной экономичности, повышенной дымности выхлопа и возможному увеличению тепловой напряженности двигателя [89, 90]. С ростом температуры выпускных газов выше допустимого предела резко увеличиваются отказы в цилиндропоршневой группе, клапанном механизме, турбине (рис. 1.2, 1.3).

В работе [70] говорится, что двигатель при различных цикловых подачах топлива по-разному реагирует на изменение частоты вращения ротора ТКР. Для подач топлива, близких к номинальной, снижение скоростного режима турбокомпрессора вызывает не только существенное падение крутящего момента и мощности двигателя, но и недопустимый рост температуры лопаток турбины.

На современных двигателях активно устанавливаются топливные системы Common rail, управляемые блоками ЭСУД [144]. Снижение частоты вращения ротора ТКР, в данных двигателях, приводит к заметному снижению эффективных показателей работы двигателя вследствие снижения цикловой подачи топлива, при снижении массового расхода воздуха. Данные [56, 72, 96], полученные с помощью программного комплекса «Дизель РК», (рис. 1.6) подтвердили данное предположение.

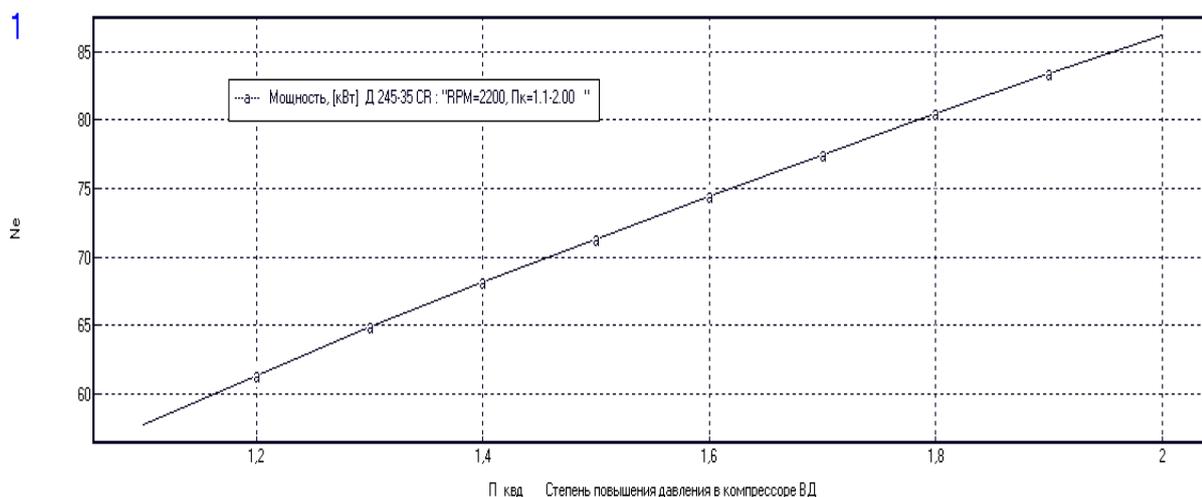


Рис.1.6. Зависимость показателей мощности и температуры перед турбиной от давления наддува на примере двигателя Д-245-35 с аккумуляторной топливной системой

Современные системы управления защищают двигатель от тепловых перегрузок и нарушения норм экологичности, но снижают эффективные показатели работы двигателя.

На необходимость контроля качества системы газотурбинного наддува указывает также то, что эксплуатация мобильных сельскохозяйственных агрегатов часто происходит в атмосферных условиях, значительно отличающихся от нормальных [75]. С падением плотности атмосферного воздуха (при росте температуры и снижении давления атмосферного воздуха) происходит ухудшение показателей двигателя. Для безнаддувных двигателей ухудшение проявляется в основном в снижении мощностных и экономических показателей, тепловая напряженность деталей при этом чаще не выходит за допустимые пределы. У дизелей с ГТН по сравнению с безнаддувными наблюдается несколько меньшее падение эффективных показателей, но значительно возрастает опасность тепловых перегрузок [78, 90].

Таким образом, изложенное выше позволяет констатировать, что условия, в которых работает ТКР, характеризуются значительным перепадом температур. В то время как его турбинная часть подвергается воздействию отработавших газов, со стороны компрессора нагрев конструкции примерно на порядок ниже [121]. Термический фактор усугубляется высокими динамическими нагрузками, возникающими вследствие высокой частоты вращения ротора турбокомпрессора. Номинальные режимы работы ТКР, определяемые требованиями разработчиков двигателей и зависящие от заявленных параметров мотора, близки к предельным. Поэтому даже незначительные отклонения в работе таких ключевых систем силового агрегата, как системы смазки, охлаждения, питания и выпуска, могут оказать влияние на работоспособность турбокомпрессора, включая снижение КПД турбокомпрессора. Рассмотрим отдельные аспекты снижения работоспособности ТКР и влияние её на показатели работы двигателя.

1.2. Анализ причин изменения показателей работоспособности ТКР в эксплуатации

Анализ причин потери работоспособности ТКР в эксплуатации показывает [1], что около 40 % отказов являются следствием повреждений лопаток компрессорного или турбинного колес посторонними предметами, 40 % повреждений вызваны неисправностью системы смазки, 20 % повреждений вызваны другими причинами.

К посторонним предметам, которые часто попадают на лопатки турбинного колеса, относятся: отломившиеся части клапанов и камеры сгорания, в том числе в результате перегрева; неправильно установленная прокладка (части прокладки могут оторваться и попасть в выпускной коллектор); болты, гайки и шайбы, которые при замене турбокомпрессора

падают в выпускной коллектор; отломившиеся части поршней ДВС, лопаток самих турбин. Все эти предметы, даже при незначительном своем размере, приводят к серьезному повреждению турбинного колеса.

Повреждение компрессорного колеса от попадания посторонних предметов случается реже, чем турбинного колеса. К посторонним предметам, попадающим на компрессорное колесо, относятся: элементы воздушного фильтра; фрагменты резины или армирующей проволоки, оторвавшиеся от впускных патрубков; болты, гайки и шайбы, попавшие во впускной патрубок при замене турбокомпрессора.

Таким образом, появление отказа ТКР может быть следствием:

- недостаточного количества масла;
- попадания в турбокомпрессор посторонних предметов;
- наличия загрязненного масла.
- нарушений в нормальной работе отдельных систем двигателя (топливоподдачи, очистки воздуха, воздухоподводящих каналов и др.).

Причиной потери работоспособности ТКР является также разрушение турбинных колес из-за потери устойчивости работы на некоторых режимах, приводящих к помпажу, сопровождаемое резкими периодическими колебания давления и расхода воздуха [42]. При помпаже происходит значительное увеличение амплитуды вибрации лопаток и накопление в них усталостных повреждений рис. 1.2 [42], что может привести к потере части лопаток (см. рис. 1.3).

В этой связи актуальной задачей становится непрерывный контроль частоты вращения вала турбокомпрессора в процессе эксплуатации двигателя, так как отказ в системе газотурбинного наддува, связанный с функционированием турбокомпрессора зачастую протекает в значительном промежутке времени, проявляя себя в виде отклонения частоты вращения вала ТКР от установленной. Внедрение системы постоянного мониторинга частоты вращения вала турбокомпрессора позволило бы на ранних стадиях зарождения неисправностей отслеживать их, анализируя тренд изменения угловой скорости ТКР и принимать решение о необходимости замены или ремонта его, не доводя неисправность в стадию необратимых.

Наличие отклонения в частоте вращения вала турбокомпрессора от установленной его характеристикой всегда указывает на наличие неисправности, как в системе газотурбинного наддува, так и двигателя в целом.

При значительном завышении частоты вращения может иметь место неисправность в системе управления байпасным клапаном турбокомпрессора, либо нарушение работы соплового аппарата в турбинах с изменяемой геометрией.

Снижение же частоты вращения может быть следствием нескольких причин:

- уменьшение количества энергии, поступающей с ОГ от двигателя;

- нарушение герметичности воздухопроводов;
- нарушение герметичности байпасного клапана;
- нарушение в работе соплового аппарата (закольцовывание газов);
- наличие механических повреждений на турбинном колесе;
- наличие механических повреждений на компрессорном колесе;
- наличие повышенного сопротивления вращению вала турбокомпрессора.

1.3. Существующие подходы в оценке технического состояния правильного функционирования ТКР в эксплуатации

Показатели работы автотракторного двигателя (мощность, расход топлива, токсичность отработавших газов) в эксплуатации во многом определяются параметрами работы турбокомпрессора (КПД турбокомпрессора, скорость вращения ротора, давление наддува, расход воздуха, время разгона, температура ОГ на входе и выходе из турбины, уровень вибрационных процессов и др.) [99, 113].

Указанные взаимосвязи на практике устанавливаются, как правило, органолептическими методами.

Правильность функционирования ТКР в эксплуатации часто оценивают по следующим признакам [80]:

- двигатель не развивает полную мощность;
- черный дым из выхлопной трубы;
- синий дым из выхлопной трубы;
- повышенный расход масла;
- шумная работа турбокомпрессора;
- повышенная тепловая напряжённость двигателя и ТКР.

1.3.1. Анализ работоспособности ТКР при наличии в работе двигателя признаков «Низкая мощность двигателя», «Черный дым из выхлопной трубы»

Оба признака являются следствием недостаточного поступления воздуха в двигатель. Причиной может быть засорение воздушного канала подвода воздуха либо его утечка из впускного коллектора или газов из выпускного коллектора. Поиск причин отказа сводится к выполнению следующих операций.

Запускается двигатель и прослушивается шум, производимый турбокомпрессором. Утечки воздуха между компрессором и двигателем могут быть определены по характерному «свисту», который возникает при этом. Пользуясь техническими данными производителя турбокомпрессора, проверяется количество поступающего воздуха. Останавливается двигатель, снимается уплотнение между воздушным фильтром и турбокомпрессором

и проверить отсутствие засорения, либо повреждения этого канала. При необходимости проверяются уплотнения турбокомпрессора, состояние коллектора и крепления глушителя на предмет отсутствия засорения, наличия посторонних предметов и надежности крепежных соединений.

Вручную проверяется свобода вращения ротора, с целью установления наличия трения крыльчатки о корпус улитки турбокомпрессора. Если при вращении рукой ротора турбины и компрессора крыльчатка задевает или трется о корпус – налицо явный износ.

Если после выполнения указанных действий неисправности не обнаружены, значит, падение мощности возникло не из-за турбокомпрессора. Необходимо искать неисправности в самом двигателе.

1.3.2. Анализ работоспособности ТКР при наличии в работе двигателя признака «Синий дым из выпускной трубы»

Появление синего дыма является следствием сгорания масла, причиной которого может быть либо его утечка в турбокомпрессоре, либо неисправности в двигателе. Поиск причин отказа сводится к выполнению следующих операций:

Проверяется состояние воздушного фильтра: любое препятствие на пути воздуха к турбокомпрессору может стать причиной утечки масла со стороны компрессора. В этом случае за ротором компрессора образуется разрежение, что вызывает засасывание масла из корпуса оси в компрессор.

Снимается корпус турбины и компрессора для проверки свободного вращения и отсутствия повреждений ротора.

Проверяется сливной маслопровод от турбокомпрессора к корпусу двигателя на отсутствие повреждений, сужений и пробок. Засорение маслопровода или повышенное давление в картере двигателя (в большинстве случаев вызываемое засорением системы вентиляции картера) приводит к тому, что масло из турбокомпрессора не возвращается в масляный картер двигателя. Установить, не повышено ли давление газов в картере. Установить факт, что используется масло, рекомендованное производителем для данного двигателя.

В последнюю очередь следует снимать выпускной коллектор двигателя на предмет проверки отсутствия следов масла. Если в ходе указанных операций неисправностей ТКР не обнаружено, то причину отказа следует искать в двигателе.

1.3.3. Анализ работоспособности ТКР при наличии в работе двигателя признака «Повышенный расход масла (без синего дыма)»

Поиск причин отказа сводится к выполнению следующих операций. Проверяется состояние воздушного фильтра, а затем крепления корпуса турбины турбокомпрессора и давление наддува в нем. Оценивается люфт

оси турбокомпрессора, проверяется отсутствие следов износа от трения ротора компрессора и турбины о стенки соответствующих корпусов. Если неисправность не выявлена, следует искать причину отказа вне турбокомпрессора.

1.3.4. Анализ работоспособности ТКР при наличии в работе двигателя признака «Шумная работа турбокомпрессора»

Поиск причин отказа сводится к выполнению следующих операций.

Проверяются все трубопроводы, находящиеся под давлением и разряжением на входе и выходе турбокомпрессора, системы выпуска.

Проверяется легкость вращения вала турбины и отсутствие трения роторов турбины и компрессора и их повреждения посторонними предметами. Если установлено повышенное сопротивление вращению или повреждение, следует снять и заменить турбокомпрессор.

Снимается сливной маслопровод и трубки сапуна. Необходимо тщательно проверить их на предмет засорения, либо повреждения, ни в коем случае не использовать герметик для крепления подающего и сливного маслопроводов турбокомпрессора. Большинство герметиков при контакте с горячим маслом растворяются в нем. Такое загрязненное масло может повредить подшипники и кольца турбокомпрессора. Часто остатки герметика вызывают засорение масляных каналов внутри турбокомпрессора.

Промыть смазочную систему двигателя, заменить масло, установить новые масляный и воздушный фильтры.

Смазать турбокомпрессор перед его установкой.

К появлению шумности работы ТКР может привести неправильный выбор режимов эксплуатации двигателя с турбокомпрессором (запуск и остановка двигателя). По тем же самым причинам, что и при остановке под нагрузкой, важно дать двигателю поработать на холостых оборотах минимум 30 секунд. Если заглушить двигатель, работающий на высоких оборотах, ротор турбокомпрессора будет продолжать вращаться без смазки, потому что давление моторного масла почти равно нулю. При этом повреждаются подшипники и кольца турбокомпрессора.

Кроме того, очень важно дать двигателю поработать на холостых оборотах минимум 30 секунд, прежде чем давать ему полную нагрузку (по тем же причинам, что и при остановке).

Нужно регулярно заменять масло и масляный фильтр, используя масло, подходящее для данного двигателя.

1.3.5. Анализ работоспособности ТКР при наличии в работе двигателя признаков повышенной теплонапряженности

Повреждения турбокомпрессора могут быть вызваны также повышенной температурой отработавших газов при работе машинного агрегата на больших высотах над уровнем моря. Любой двигатель, который работает при температурах, близких к предельным на уровне моря, превысит эти температуры на высоте 1500 м над уровнем моря. Работа на таких высотах над уровнем моря может привести к превышению максимальной скорости вращения вала турбокомпрессора. Поэтому необходимо в соответствии с требованиями производителя изменить систему подачи топлива. Кроме этого, на увеличение температуры отработавших газов значительное влияние оказывают: поздний впрыск топлива, бедная смесь и поздний момент впрыска. Повышенное сопротивление на впуске, причинами которого могут быть воздушный фильтр, поврежденные соединения или патрубки недостаточного диаметра, ведет к уменьшению количества воздуха, поступающего в цилиндры, и повышению температуры отработавших газов [44]. Повышенное сопротивление на впуске и работа на больших высотах над уровнем моря могут привести к поломке корпуса турбинного колеса и даже к поломке самого турбинного колеса под действием высоких температур. Если не менять воздушный фильтр в соответствии с требованиями производителя, то существует высокая вероятность отложения грязи в корпусе компрессорного колеса, что приведет к уменьшению поступления воздуха в цилиндры и далее к перегреву. Так же неплотно прилегающие прокладки во впускном и выпускном коллекторе приводят к уменьшению подачи воздуха.

Фактором снижения частоты вращения ротора турбокомпрессора в эксплуатации, как уже отмечалось ранее, является увеличение механических потерь в результате трения вращающихся частей ротора о неподвижные детали ТКР. Такое в практике наблюдается при увеличенном осевом перемещении ротора, а также вследствие отложения смолистых нагарообразований на рабочих деталях турбокомпрессора. Отклонение скоростного режима ТКР от номинального в сторону уменьшения приводит при неизменной топливоподаче к снижению коэффициента избытка воздуха, а, следовательно, и росту теплонапряженности двигателя [89, 90].

Неисправностями, приводящими к замедлению частоты вращения ротора ТКР, а, следовательно, и росту тепловых нагрузок на двигатель и ТКР могут также быть: недостаток и загрязнение масла, попадание посторонних предметов.

Наиболее частой причиной недостатка масла является отложения в трубопроводах, по которым подается и отводится масло в турбокомпрессор. Эти отложения значительно уменьшают площадь проходного сечения трубопровода, а иногда и полностью забивают трубопроводы. Для нор-

мальной работы турбокомпрессора очень важно, чтобы при тяжелых условиях работы подавалось определенное количество масла в подшипники турбокомпрессора. Масло перед подачей в подшипники обязательно должно пройти через фильтр. При постоянной подаче чистого масла в необходимых количествах подшипники турбокомпрессора могут проработать тысячи часов без заметного износа.

Первыми выходят из строя из-за недостатка масла подшипники. После выхода из строя одного или нескольких подшипников могут последовать другие повреждения, такие как трение роторов турбины и компрессора, износ уплотнительных колец. В худшем случае может произойти поломка оси турбины.

В нормальных условиях ось и подшипники работают при температурах 60-90 °С.

В случае нехватки масла резко увеличивается теплоотдача на ротор турбины. Это тепло в совокупности с теплом, выделяющимся при трении в подшипниках, поднимает температуру оси до приблизительно 400 °С, приводя к коксованию остатка масла и вызывая перегрев оси.

Кроме того, перегреваются все подшипники и корпус оси. Последний деформируется, а материал подшипников наваривается на ось турбокомпрессора.

В случае биения оси возникают значительные повреждения на внешних частях впускного канала, а уплотнительные кольца утрачивают свои свойства.

Из-за поломки подшипников лопатки ротора компрессора ударяются о внутреннюю его часть и повреждаются.

При высокой температуре, возникающей вследствие трения при биении оси, алюминиевые подшипники плавятся. Бронзовые подшипники в случае перегрева теряют оловянный слой и изменяют цвет.

Причиной потери работоспособности ТКР также может быть попадание посторонних предметов из-за поломки клапанов или поршневых колец.

Повреждения ротора компрессора могут быть вызваны множеством причин. Например, если во впускной канал компрессора попадает твердый предмет, края лопаток ротора компрессора сбиваются, а если мягкий (кусочек ткани или резины) – гнутся.

Абразивные материалы, такие как песок или грязь, быстро изнашивают лопатки ротора компрессора.

Следствием этого явления будет также разбалансировка оси и роторов турбины и компрессора. После этого дальнейшие повреждения неизбежны.

При скоростях вращения, достигающих 100000-110000 об/мин, даже легкий дисбаланс ротора может увеличиться до предельных величин.

Нарушение правильного функционирования ТКР может происходить по причине использования загрязненного масла. При загрязнении масла происходят повреждения деталей. Кроме того, при этом быстро изнашивается рабочая поверхность подшипника.

Внутренняя и наружная поверхности подшипника может стачиваться настолько, что полностью удаляется слой олова.

Густое масло задерживается на внутренних перегородках корпуса оси и снижает герметичность, вызывая большие утечки масла. Густое масло может также закоксоваться под воздействием тепла и затем стать причиной последующих повреждений подшипников и уплотнений.

Загрязнения могут задерживаться на поверхности алюминиевых вкладышей и вследствие этого вызывать значительные отложения на оси подшипника и в его корпусе.

Отложение закоксованного масла на роторе турбины может быть вызвано дефектом системы герметичности турбокомпрессора, загрязненным маслом в корпусе оси или оттоком масла в систему выпуска из-за сильного износа самого двигателя. Это может быть также вызвано повышенным давлением в масляном картере двигателя, засорением сливного маслопровода турбокомпрессора или загрязнением воздушного фильтра.

Таким образом, среди возможных причин выхода из строя ТКР можно выделить несколько основных факторов. В первую очередь, это нарушение смазки подшипников ротора. Причем на работоспособность турбины оказывают влияние и качество масла, и его количество (величина подачи), но особенно опасно присутствие в смазочном материале различных загрязнений. Твердые частицы, попадая в зазоры между трущимися поверхностями, вызывают их механический износ. Результат работы мелких посторонних включений выглядит как полирование контактных поверхностей вала и подшипников, сопровождающееся «зализыванием» их внешних кромок. Крупные частицы в свою очередь оказывают более серьезное абразивное воздействие – интенсивно шлифуют поверхности трения с образованием глубоких задиров. В обоих случаях результат один – унос материала и увеличение зазоров, что в итоге приводит к выходу из строя дорогостоящего узла. Причины повышенного содержания в масле твердых частиц хорошо известны: несвоевременная замена эксплуатационного материала и применение некачественного масляного фильтра. Наряду с механическими опасны и химические загрязнения масла.

Наиболее распространенный вариант – попадание в систему смазки топлива вследствие нарушения рабочего процесса в двигателе (например, при неисправности топливной аппаратуры). Негативное воздействие химических загрязнений сводится к тому, что они снижают прочность масляной пленки. Значительно сокращается ресурс турбокомпрессора при выключении двигателя сразу после продолжительной работы на повышенных

нагрузках. В этом случае при остановке двигателя происходит прекращение подачи масла к подшипникам, а ротор ТКР продолжает вращаться по инерции в условиях граничной смазки. Как результат – повышенный износ подшипникового узла.

К числу распространенных причин отказа турбокомпрессора относится и попадание в него посторонних предметов. Как правило, это заканчивается необратимыми повреждениями компрессорного или турбинного колес. Даже самое незначительное повреждение может нарушить балансировку ротора, а уже дисбаланс окончательно выведет из строя весь агрегат. Помимо прочего, колесо компрессора часто подвергается абразивному воздействию пыли и песка, попадающие во впускную систему через поврежденный воздушный фильтр или неплотные соединения системы впуска. Для турбинного колеса источником отказа может быть система выпуска отработавших газов. Двигатель при определенных условиях эксплуатации может «выстреливать» в турбину твердыми кусочками нагара. Учитывая предельную динамику турбины, такой «обстрел» может оказаться губительным.

Перечень основных причин отказов ТКР завершается превышением допустимых режимов его работы. Прежде всего, речь идет о превышении предельной частоты вращения ротора. Распространенный источник «перекручивания» турбины – резкое повышение температуры отработавших газов, обычно вследствие неисправности системы топливоподачи или попыток самостоятельной регулировки ТНВД. Типичные повреждения: перегретые опорные шейки вала ротора, множественные наслоения закоксованного масла, часто – искривление тыльной плоскости турбинного кольца и даже выкрашивание периферийной части лопаток турбины. Помимо нарушения состава топливной смеси, избыточный наддув может быть следствием неправильной работы элементов системы регулирования турбокомпрессора, например, байпасного клапана. Казалось бы, это чисто внутренние причины, касающиеся надежности самой системы турбонаддува, но они могут провоцироваться внешними неисправностями, такими, как ложные сигналы системы управления двигателем.

Ремонту турбокомпрессора в обязательном порядке должна предшествовать начальная диагностика непосредственно на тракторе или на автомобиле. Объем таких работ обычно включает в себя измерения продольного и поперечного люфта турбины, оценку состояния впускной крыльчатки и герметичности уплотнений. Одним из распространенных методов инструментального контроля является проверка давления наддува с помощью манометра, подсоединенного к измерительному штуцеру во впускном коллекторе. На многих современных тракторах (например, Fendt, John Deere) специальный прибор имеется в штатной комбинации [124, 125].

Турбокомпрессор (ТКР) также часто выходит из строя по причине неисправности какой-либо из систем двигателя. На работоспособность ТКР влияют такие факторы, как состояние цилиндропоршневой группы, герметичность впускного тракта, исправность систем смазки и питания. Все это указывает на необходимость контроля показателей функционирования ТКР в процессе работы мобильной машины. Диагностирование с использованием внешних и встроенных средств контроля позволит определить техническое состояние ТКР без его разборки, прогнозировать его срок службы, управлять его техническим состоянием, назначая соответствующие предупредительные работы и выполняя их в процессе технического обслуживания и ремонта [180].

1.4. Обзор методов и средств диагностирования ТКР при ТО и ремонте мобильной техники

Задачей диагностирования является выбор конкретных объектов и определение предельных значений структурных (функциональных) параметров, при достижении которых ТКР теряет работоспособность. Вывод о состоянии ТКР делается на основании сравнения с эталонными или нормативными значениями показателей [7, 8, 9, 21, 138, 149, 170].

На рис. 1.7 приведена схема структурных элементов дизеля с ГТН, по отношению к которым может производиться диагностирование.

Работоспособность каждого элемента и ее составляющих определяется совокупностью регламентированных показателей их технического состояния или структурными параметрами [151, 167, 176]. На этапе анализа ТКР как диагностируемого объекта следует выбрать необходимое и достаточное количество структурных параметров. Их выбор должен в идеале обеспечивать отсутствие ошибок пропуска неисправного состояния и ошибок ложного отбраковывания (при создании диагностических моделей такие ошибки принято называть ошибками 1 и 2 рода) [113, 114, 115].

Оценочными показателями качества работы ТКР выступают значения диагностических параметров. В свою очередь перечень диагностических параметров во многом определяется методами, средствами и условиями диагностирования [13, 67, 83, 84, 99, 100, 105, 116, 117, 171, 179].

Наиболее полную информацию о состоянии структурного параметра при проведении безразборной диагностики дает анализ процесса воздухоподдачи по давлению наддува, расходу воздуха, оборотам и времени разгона ТКР, температуре отработавших газов на входе и выходе из турбины, уровню вибрационных процессов, характеризующих износы подшипниковых узлов и дисбаланс ротора ТКР, по значению КПД турбокомпрессора и его составляющих.

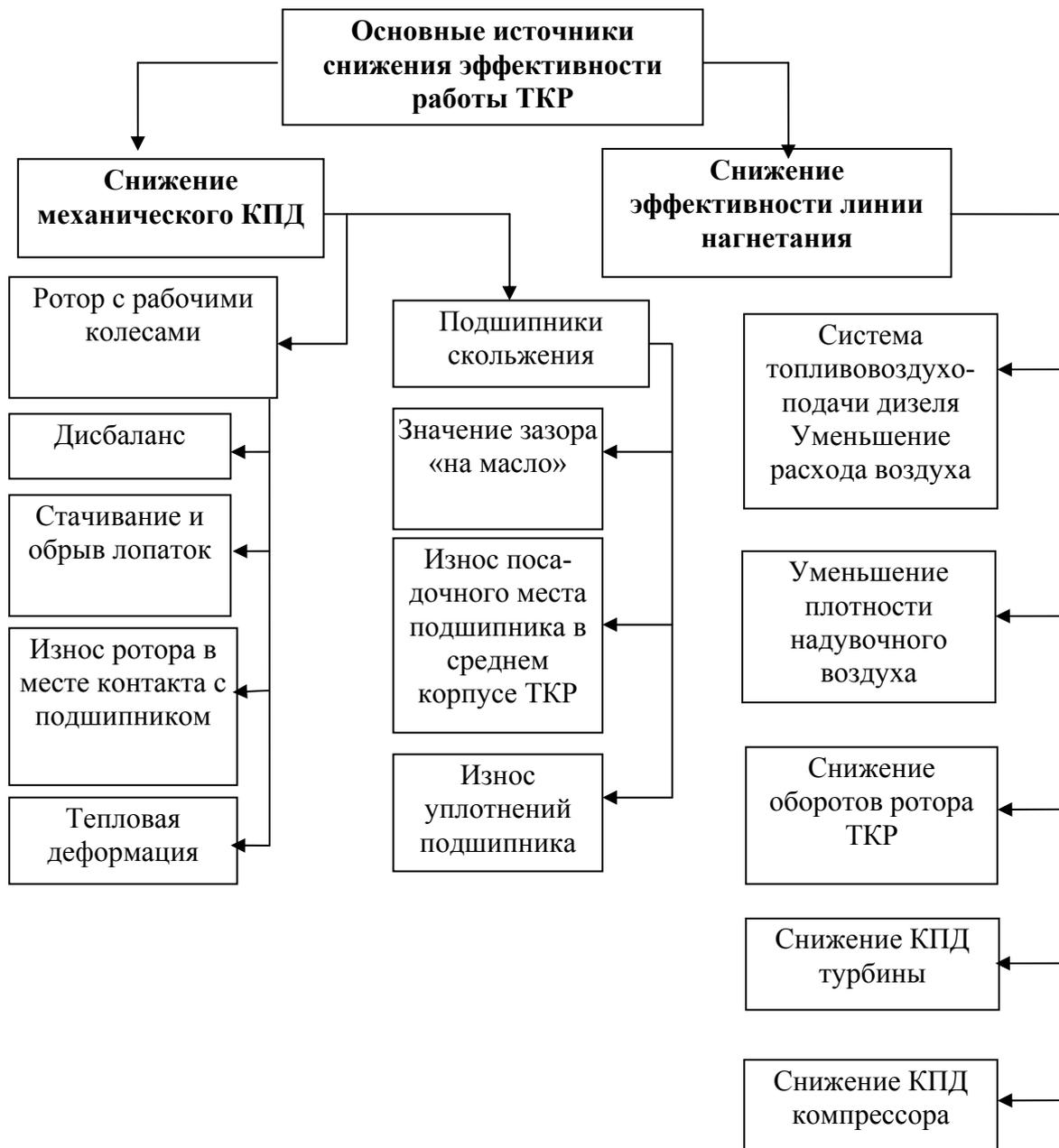


Рис. 1.7. Схема классификации источников снижения эффективности работы ТКР

В системах турбонаддува в качестве диагностических параметров могут приниматься характерные параметры кривых давлений (расхода) воздуха до и после компрессора, а также параметры, полученные путем обработки:

- среднего давления наддува;
- усредненного значения расхода воздуха;
- времени разгона и времени выбега ротора ТКР;
- коэффициента избытка воздуха;
- температуры отработавших газов на входе и выходе из турбины;

- цикловой подачи топлива;
- частоты вращения ротора ТКР;
- КПД турбокомпрессора.

Для оценки технического состояния агрегатов турбонаддува могут быть применены различные методы диагностирования (табл. 1.1) [2, 47, 82, 101, 107]. При проверке работоспособности элементов воздухоподачи используют методы диагностирования, выявляющие (без указания места и причины) определенную совокупность отказов и повреждений (повышенная дымность в работе двигателя и шумность работы ТКР, нестабильность параметров воздухоподачи и т.д.).

Т а б л и ц а 1.1

Классификация методов диагностирования агрегатов турбонаддува

Классификационные признаки	Методы диагностирования
Задачи диагностирования	Проверка работоспособности; проверка правильности функционирования; поиск дефектов
Характер измерения параметров	Прямой; косвенный
Условия проведения диагностирования	Полевые; станция ТО; безмоторные;
Применение диагностических средств	Органолептические; инструментальные
Режим работы объекта	При установившемся режиме; при неустановившемся режиме; при статодинамическом режиме
Диагностические параметры	Параметры рабочего процесса; параметры сопутствующих процессов; структурные параметры
Периодичность диагностирования	Регламентный; заявочный; непрерывный
По степени разборки объекта диагностирования	Разборная; безразборная
Используемый физический процесс	Виброакустический; магнитоэлектрический; спектрографический; тепловой; гидравлический; газоаналитический; кинематический; другие

При проверке правильности функционирования ТКР диагностирование направлено на определение совокупности дефектов технологических настроек в системах, вызывающих недопустимое снижение технико-экономических и экологических показателей [168].

При поиске дефектов методы диагностирования позволяют выявить место, вид и причину дефекта (износ подшипников, снижение коэффициента избытка воздуха и т.д.).

По степени разборки объекта диагностирования методы подразделяются на разборные и безразборные [11, 15, 16, 33, 34, 35].

Разборные методы применяются при инструментальной оценке износа подшипникового узла, ротора ТКР, корпусных деталей [37].

Методы безразборной диагностики, как правило, основаны на косвенных измерениях структурных параметров при установке датчиков или диагностических устройств снаружи диагностируемого объекта без снятия его с дизеля или на стенде для испытания ТКР либо двигателя [132].

По диагностическим параметрам все методы делят на три группы в зависимости от того, характеризует ли измеряемый параметр рабочий процесс всего двигателя или его составной части, сопутствующий процесс работы, или непосредственно структурный параметр детали или сопряжения деталей.

Методы диагностирования по параметрам рабочих процессов позволяют проверять выходные показатели ТКР (давление наддува, КПД турбокомпрессора, частота вращения ротора ТКР) и многие технические характеристики его составных частей (давление масла на входе и выходе из ТКР, время разгона и выбега ротора турбокомпрессора, уровень вибрационных процессов, температура газов на входе в турбину и др.). Обычно точность измерения этих параметров достаточно высока, так как в большинстве случаев осуществляют прямое измерение контролируемой физической величины [75, 134, 135, 136].

Методы диагностирования по параметрам сопутствующих процессов дают возможность косвенно определять те же параметры рабочих процессов, а также структурные параметры деталей и сопряжения, если их нельзя или нецелесообразно измерять непосредственно. В этом случае измеряют показатели процессов, генерируемых рабочими. Это, как правило, процессы вибрации, шума, нагрева (тепленапряженности), дымности отработавших газов [77, 85].

Методы диагностирования по структурным параметрам позволяют путем прямых измерений определять износы деталей (подшипниковых пар, деталей ротора ТКР), состояние газоподводящих и газоотводящих трактов, системы очистки воздуха и т.п.). В основе этих методов лежит измерение геометрических размеров, взаимного перемещения деталей или геометрических размеров детали (сопряжения) [112, 118, 122, 123, 131].

По используемому физическому процессу методы диагностирования могут подразделяться на виброакустические, спектрографические, магнитоэлектрические, тепловые, гидравлические, газоаналитические, кинематический и некоторые другие [93, 111].

Каждый метод предназначен для контроля определенного физического процесса и основан на применении определенного физического явления. Классификация по использованному физическому процессу позволяет наиболее полно выявить возможности и техническую характеристику соответствующего метода диагностирования [127, 128, 130].

Физический процесс характеризуется изменением физической величины во времени. В основе гидравлического – давление; теплового – температура; виброакустического – амплитуда колебаний на определенных частотах и т.д.

Диагностирование ТКР виброакустическим методом. Процесс сжатия и подачи воздуха во впускной тракт дизеля сопровождается формированиям в различных местах ТКР виброакустических сигналов, вызываемых как перемещениями подвижных деталей ТКР (оси ротора, плавающей втулки и др.), так и волнами давления отработавших газов и расходуемого двигателем воздуха.

Достаточно полную информацию о динамике состояния ротора ТКР в процессе его функционирования дают максимальные значения виброскорости и виброперемещения (виброускорения), возникающие при работе двигателя.

Безусловным достоинством виброакустической диагностики является простейший способ закрепления первичных преобразователей на объекте. Такие новые методы, как лазерная вибродиагностика вообще допускают бесконтактный съем сигнала.

Вместе с тем обработка, интерпретация информации, распознавание параметров и дефектов весьма сложны, недостаточно достоверны, стабильны и информативны. Вибросигнал очень сильно зависит от способа и качества закрепления узла, от применяемых материалов, от состояния деталей, на которые установлен объект. Даже для испытаний в безмоторных условиях желательно применение малошумящих стендов. При испытаниях на дизелях диагностические параметры изменяются в сравнении с испытаниями в модельных условиях, а расшифровка сигналов становится еще менее надежной. Расчетное определение собственных частот колебаний системы и ее элементов затруднено и обычно связано с грубыми допущениями. По этой причине амплитудно-частотные характеристики обычно выявляют опытным путем.

Большое число генераторов колебаний затрудняет идентификацию и создание аналитической модели процесса. Ее можно построить только на основе широких экспериментальных исследований [88]. При решении таких задач используются статические методы, обучающие эксперименты.

Однако в любом случае требуется предварительное широкомасштабное экспериментальное исследование ТКР апробированными методами и последующие испытания виброакустическим методикам. Даже современные методы и способы обработки сигналов на ПК (с помощью соответствующих пакетов прикладных программ) при решении задач виброакустического диагностирования требуют высококвалифицированного оператора и большого количества статистических данных, определяемых экспериментальным путем [1, 19].

Магнитоэлектрический метод диагностирования по параметрам перемещений подвижных деталей. Метод основан на регистрации изменяющегося магнитного потока в предварительно намагниченных деталях диагностического механизма. Индуцируемая ЭДС в магниточувствительном элементе датчика пропорциональна скорости движения намагниченной детали. Метод позволяет регистрировать перемещения, фазовые параметры деталей агрегатов, определять отклонения этих параметров от номинальных значений. Спектрографические методы («металл в среде») весьма удобны, имеют хорошо разработанное математическое обеспечение и апробированы, например, при диагностировании и прогнозировании остаточного ресурса поршневой группы дизеля. Фирмами «Caldwell Development» и «Spectro Incorp» (США) разработаны для таких целей «датчики – феррографы», регистрирующие частицы размером менее 150 микрон. Но для задач с ТКР такие методы не пригодны из-за отсутствия накопления металла в жидкости, малости износов, универсальности материалов для различных деталей и недостаточной информативности.

Тепловые методы диагностирования основаны на определении температуры отработавших газов, анализе температуры определенных деталей, например, выпускного коллектора.

В научно-технической литературе предлагается ряд критериев, по которым можно косвенно судить о теплонапряженности двигателя в целом или отдельных его деталей (критерии Б.Я. Гинцбурга, И.Л. Пономарева, В.А. Ваншейдта, А.К. Костина и др.). Наиболее обоснованным критерием косвенной оценки тепловой напряженности считается комплексный критерий q_n , предложенный А. К. Костиным в работе [90].

Простым и давно используемым в практике эксплуатации косвенным параметром теплонапряженности является также температура газов на выпуске [140]. Использование температуры выпускных газов особенно удобно при оценке теплонапряженности двигателей, работающих большую часть времени на переходных и неуставившихся режимах. По температуре выпускных газов можно не только судить о загрузке двигателя, но и оценивать качество согласованной работы систем топливо-воздухоподдачи в эксплуатации [69].

Еще более перспективны методы контроля параметров ТКР через параметры рабочего процесса дизеля. Это легко объяснимо: влияние первых на вторые значительно, а в процессе эксплуатации параметры рабочего процесса предполагается постоянно контролировать. Поэтому эти методы разрабатываются в первую очередь для имеющих большой ресурс тихоходных судовых дизелей и практически не применяются в быстроходных автотракторных дизелях в связи с высокой стоимостью и ограниченным сроком работы преобразователей и датчиков [43, 45].

Кинематический метод диагностирования характеризуется изменением положения, движения деталей и их сопряжении с геометрической точки зрения. Этот метод включает в себя непосредственное измерение размеров, износов деталей, зазоров их сопряжений, применяется при проверке отдельных узлов и деталей ТКР и, как правило, производится при неработающем двигателе или разобранных узлах.

Газоаналитический метод оценки состояния ТКР по содержанию в отработавших газах дизеля рассматривается в работе [46]. По содержанию в ОГ O_2 и CO_2 оценивается качество процессов смесеобразования и сгорания и на этой основе предлагается определять техническое состояние ТКР. С введением нормативов на выбросы вредных веществ с ОГ дизелей охват этим методом диагностирования существенно расширяется. Вместе с тем по результатам диагностирования сложно судить о конкретном дефекте в ТКР и количественных характеристиках параметров его технического состояния.

Математическое моделирование воздухоподачи реального ДВС связано с меньшими материальными затратами, но, главное, позволяет более точно и достоверно решить задачу. Диагностическая модель создается не на базе вероятностно-статистического подхода, а точным детерминированным методом. Становится возможным точный учет допустимых отклонений структурных параметров ТПС и параметров технологической неустойчивости. Альтернативные методы не позволяют практически подойти к диагностированию с той же корректностью [10].

К числу наиболее применяемых методов изучения и диагностирования работы ТКР относятся методы, основанные на измерении давления наддува [3, 4]. С использованием дополнительной информации и расчетных методов этот сигнал позволяет достаточно точно отслеживать эффективность функционирования турбонаддува непосредственно в процессе эксплуатации дизеля. К достоинствам метода также относят и допустимую для задач диагностики сложность монтажа датчика.

В большинстве предложенных методик диагноз базируется на сравнении измеренной информации с эталонной, в результате чего делается более или менее обоснованный вывод об имеющейся неисправности ТКР.

Выше представленные решения и методы позволяют делать выводы о нахождения неисправностей различного рода, возникающих в системе воздухоподачи, но не один из них не дает возможности оценить полную картину эффективности работы турбокомпрессора во времени. С этой задачей может справиться метод определения технического состояния турбокомпрессора, в основу которого заложена возможность определения и анализа коэффициента полезного действия турбокомпрессора и его составляющих. Анализ данных позволяет определить не только эффективность турбокомпрессора, но и при её снижении указать на локализацию неисправности.

Автоматизация постановки диагноза позволяет повысить его достоверность, уменьшить трудоемкость работ и снизить требования к квалификации исполнителя [12, 120].

Решению некоторых указанных задач посвящены работы [40, 41, 181]. Авторами отмечается, что создана универсальная информативная методика диагностирования, позволяющая обнаруживать и количественно оценивать типовые дефекты ТКР по диагностической модели в форме логической таблицы неисправностей.

При диагностировании тракторных и комбайновых дизелей используют различные контрольно-диагностические устройства и системы. Разнообразие диагностических средств представлено в классификационной схеме (табл. 1.2), отражающей их различие по назначению, степени автоматизации измерений, спектру решаемых задач, конструктивным особенностям и др. [157–160, 162, 172, 175].

Основной недостаток методов диагностирования воздухоподающих систем с помощью механических средств – неизбежное их вмешательство в нормальное функционирование системы. Помимо этого, производимая частичная разборка может отрицательно сказываться на работоспособности элементов системы.

Рассмотрим некоторые из применяемых в настоящее время средств и устройств определения параметров воздухоподачи, которые могли быть использованы для диагностирования ТКР.

Например, рядом иностранных фирм [79] разработаны приборы для определения технического состояния турбокомпрессора, использование которых связано с минимальным вмешательством в работу дизеля. Общий их принцип в том, что во впускной трубопровод монтируют датчик давления либо датчик расхода воздуха. При изменении давления во впускном трубопроводе сигнал поступает от исполнительного механизма к регистрирующему устройству.

Принципиальная основа других разработанных способов и устройств – анализ кривой давления наддува в трубопроводе между компрессором и впускным коллектором. Эти способы позволяют выявить неисправности ТКР.

Таблица 1.2

Классификация средств диагностирования

Классифицирующие признаки	Средства диагностирования
Исполнение	Портативные; передвижные; стационарные; бортовые; часть общей системы управления работой дизеля
Состояние объекта диагностирования	Используемые при: нефункционирующем объекте; функционирующем объекте; тестовых воздействиях на объект; любых состояниях объекта
Степень автоматизации	Механизированные; автоматизированные; автоматические
Назначение и приспособленность к диагностированию элементов ТА	Устройства и приборы для измерения отдельных параметров или узлов; стенды для испытаний ТПС; диагностические системы и мотор-тестеры;
Характеристика информации по диагностируемому объекту	Количественная оценка; качественная оценка; количественная и (или) качественная оценка с прогнозированием состояния
Адаптивность	Все операции диагностирования проводятся с участием оператора (мастера-наладчика); настройка параметров и режимов диагностирования производится оператором; самонастраивающиеся
Спектр решаемых задач	Информация о состоянии; информация о состоянии, прогнозирование и рекомендации; информация о состоянии, прогнозирование и рекомендации, формирование базы данных для автоматической настройки и управления работой ДВС

Ряд эффективных методов, реализованных в диагностических приборах, автоматизированных установках, машинотестерах, не представляется возможным для применения на практике без предварительных мер по улучшению приспособленности как диагностических средств, так дизеля и его ТКР к диагностированию [102]. Улучшение приспособленности ТКР к базовым диагностическим средствам снижает трудоемкость установки датчиков на объект, уменьшает количество переходных устройств, повышает эффективность диагностирования.

В целом следует отметить, что данные устройства и средства диагностирования позволяют производить оценку за один цикл измерений, не обеспечивая выдачу конкретных данных по ресурсу и вероятному дефекту, не указывает о конкретном дефекте ТКР. Не дают полного представления о многих диагностических параметрах. Затруднен анализ полученной информации диагностируемого ТКР. Все это требует разработки современных средств диагностирования и их программного обеспечения, т.е. электронных автоматизированных систем.

Электронные автоматизированные системы создают условия для решения проблемы диагностирования на принципиально новой индустриальной основе [36, 66], то есть выполнение почти всех операций технического диагностирования блоками электронной установки с выдачей конечного результата о составе объекта в виде «годен», «негоден», «норма», «меньше нормы», «больше нормы», категории качества и т.п. При этом процесс диагностирования ТКР может осуществляться непрерывно по заданной оптимальной программе в определенной закономерной последовательности.

1.5. Анализ методов поиска неисправностей

Современный уровень развития информационных технологий и компьютерной техники определил возможность объединения испытательных устройств разного класса в единый комплекс. Такие системы могут быть оснащены цифровым осциллографом для непосредственного контроля сигналов в электрических цепях, встроенными экспертными системами контроля отклонения параметров от заданных. К средствам испытания, обладающими более широкими и универсальными возможностями, относятся устройства, основанные на методах измерения мощностных и технико-экономических характеристик. К этим характеристикам можно отнести индикаторные диаграммы и внешние скоростные характеристики [56, с. 127].

Индикаторная диаграмма (ИД) – графическое представление совокупности термодинамических процессов, составляющих рабочий цикл двигателя внутреннего сгорания, в координатах «давление-объем», «давление-температура». Различают теоретическую и действительную индикаторные диаграммы. Теоретическая ИД – математическая модель, полученная по расчетным параметрам рабочего тела в конечных точках процессов. Действительную ИД получают в результате экспериментальных исследований реального двигателя. На основании сравнения теоретической и действительной ИД можно сделать вывод о характере протекания рабочих процессов в цилиндрах двигателя, а, следовательно, и вывод о состоянии самого двигателя [93].

Получение действительной ИД связано со снятием двигателя с автомобиля и установкой его в специальный стенд, на котором измеряются основные показатели ДВС. Очевидный недостаток метода – увеличение времени и трудозатрат на проведение испытания. Поэтому такой подход осуществляется, в основном, на этапах проектирования и доводки двигателя [97].

Также стоит отметить сложность математических моделей ДВС, как и любые теоретические исследования, использующие предварительные допущения.

Внешняя скоростная характеристика (ВСХ) – зависимость основных параметров двигателя (эффективной мощности, мощности потерь, эффективного крутящего момента, расхода топлива и воздуха, угла опережения зажигания) от частоты вращения коленчатого вала при неподвижном положении органа, управляющего подачей топлива, и неизменной нагрузке [41]. При работе автомобиля большинство неисправностей проявляется в виде внешних признаков (симптомов). Часто внешние признаки различных неисправностей носят одинаковый характер. Например, дизель может работать с перебоями и не развивать достаточной мощности в следующих случаях [14]:

- при неудовлетворительной работе форсунок;
- при попадании воды в цилиндры и воздуха в топливо;
- при зависании плунжеров во втулках.

Зная наиболее часто встречающиеся неисправности, а также внешние проявления, обнаруживают возникшую неисправность, не проводя излишних проверок и разборок. Нередко прибегают к методам последовательного исключения. Например, неработающий цилиндр можно обнаружить путём поочерёдного выключения цилиндров (при отключении и включении характер и звук выхлопа не меняются) [67, с. 108].

Чтобы правильно и быстро поставить диагноз при проверке сложного объекта с помощью отдельных средств диагностирования, необходимо располагать большим количеством данных о функциональных связях между возможными неисправностями и их симптомами, а также обладать достаточным опытом [17].

Если по какой-либо составной части известны лишь комбинации симптомов и их связи с соответствующими неисправностями, но неизвестны вероятности наиболее частого возникновения, характерных для данного симптома, то в этом случае поиск конкретной неисправности ведут, исходя из предположения, что при данном симптоме все связанные с ним неисправности равновероятны [6, с. 17].

Для выявления причин таких неисправностей должна быть разработана целая система измерительных преобразователей, которые фиксировали бы как редко, так и часто встречающиеся неисправности. Теоретически, такой

метод определения неисправностей осуществим, но практически чрезвычайно сложен и дорог [34].

Применение положений теории вероятности, в частности теории информации, позволяет значительно упростить процесс постановки диагноза.

Сущность вероятностного подхода к определению характера неисправности заключается в следующем. На основе статистических данных о закономерностях изменения параметров состояния в зависимости от наработки составной части или машины в целом, о возможных комбинациях симптомов и их связях с неисправностями для каждой неисправности устанавливают вероятность её возникновения и вероятность появления каждого симптома. По полученным материалам разрабатывают программу поиска данной неисправности, который ведут в порядке убывания вероятности возникновения различных отказов, характерных для данного симптома [37].

Например, наиболее часто встречающаяся причина перебоев при работе дизелей – неудовлетворительное состояние форсунок. Следовательно, поиск неисправности в этом случае следует начинать с проверки рабочих форсунок.

В целях ещё большего снижения затрат времени и средств на поиски неисправности при разработке программ – поисков следует принимать во внимание не только вероятность возникновения неисправности, но и время, затрачиваемое на выявление каждой из них при диагностировании. Поиск неисправностей по таким критериям получил название метода время-вероятность [65].

В этом случае последовательность проверки устанавливают, исходя из отношения времени t , необходимого на выявление неисправности, к вероятности P появления этой неисправности.

Поиск неисправности начинают с составных частей, для которых указанное отношение получается минимальным. Например, перегрев двигателя, сопровождаемый кипением воды в радиаторе, возможен в следующих случаях:

- при срезе шпонки крыльчатки водяного насоса;
- при чрезмерном загрязнении сердцевины радиатора;
- при ослаблении ремня вентилятора.

Наиболее часто встречается ослабление ремня вентилятора, а время, требуемое на проверку его натяжения, является минимальным. Отсюда следует, что поиск причины указанной неисправности нужно начинать с проверки натяжения ремня вентилятора.

При одинаковой вероятности возникновения двух или более неисправностей, характерных для какого-либо симптома, поиск осуществляют, исходя из минимального времени, затрачиваемого на проверку. Если отношение одинаково для поиска неисправностей с одинаковыми внешними

признаками, то в этом случае поиск по методу «время-вероятность» неэффективен, т.к. он приводит к неопределённости, т.е. к случайному выбору последовательности поиска возникшей неисправности.

Важный критерий при выборе оптимальной последовательности поиска неисправностей – минимальная величина средней стоимости проверки. При использовании этого критерия стремятся к тому, чтобы максимальная стоимость поиска отказавшего элемента была наименьшей по сравнению с затратами, получаемыми при других методах проверки. Такой метод поиска получил название метода минимакса.

Как верно замечает Нигматуллин Ш.В. [67] в своем диссертационном исследовании на тему «Совершенствование методов и средств диагностирования топливной аппаратуры автотракторных и комбайновых дизелей», важнейшая проблема в области технической диагностики автомобилей – установление симптомов в зависимости от наработки составных частей или автомобиля в целом, а также выявление зависимостей между этими симптомами и соответствующим им параметрам технического состояния машин. Знание этих закономерностей и зависимостей при известных предельных значениях параметров технического состояния позволяет своевременно предупреждать неисправности и отказы.

Если имеются неисправности и отказы, сначала устанавливаются возможные причины их возникновения по характерным признакам. Затем, исходя из предполагаемой причины возникновения неисправности, подбирают соответствующие диагностические средства, с помощью которых дают заключение (ставят диагноз) о характере и сущности неисправности.

Метод логического поиска с последовательным исключением не требует применения дополнительного диагностического оборудования, обладает невысокой трудоёмкостью, не требует от проводящего диагностирование высокой квалификации и специальных знаний, но обладает высокой зависимостью от человеческого фактора, т.е. диагностирование ведётся на основании показаний водителя (рис. 1.8). Для снижения влияния человеческого фактора нами предлагается вероятностно-логический метод поиска неисправностей, который обладает преимуществами всех проанализированных методов.

Для реализации предлагаемого метода необходимо установить на автомобиль систему встроенного диагностирования для элементов наиболее часто выходящих из строя. Для дизельного двигателя такой системой является топливная система высокого давления. Это объясняется в основном качеством используемого топлива.

Принципиальная схема топливной системы включает в себя топливный бак, топливопроводы низкого давления, фильтр грубой очистки, топливopодкачивающий насос, фильтры тонкой очистки топлива и топливная система высокого давления [34, с. 34].

К основным элементам топливной системы высокого давления относятся:

- топливный насос высокого давления (ТНВД);
- топливопроводы высокого давления;
- форсунки.

Указанные элементы обеспечивают систему подачей топлива в цилиндры двигателя, что способствует при правильной регулировке подавать топливо в необходимые моменты по времени и продолжительности подачи топлива (количества подаваемого топлива).

Элементы ТНВД включают в себя [1, 4]:

- корпус;
- кулачковый вал;
- прецизионную пару;
- подпружиненный клапан;

Элементы форсунки включают в себя:

- корпус;
- иглу;
- пружину;

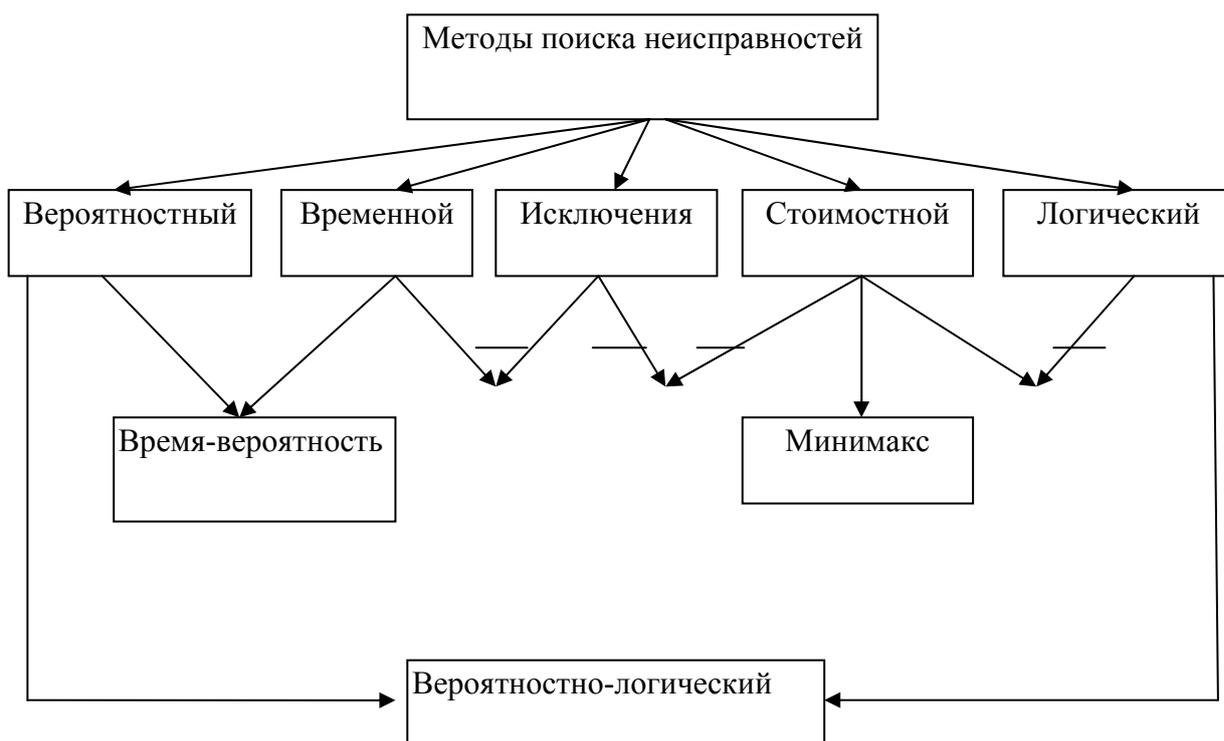


Рис. 1.8. Методы поиска неисправностей

Данные устройства обеспечивают работу двигателя на необходимых режимах в процессе работы автомобиля.

С теоретической точки зрения топливная система представляет собой совокупность последовательно соединенных элементов, отказ одного из

которых способен привести к неисправности или полному отказу всей системы.

При отказе одного или нескольких элементов приводит к нарушению работы всей системы с заданными характеристиками и параметрами. При этом автомобиль может сохранить способность к движению при нарушенных параметрах топливной экономичности, экологичности, мощности и других, что равносильно отказу всей системы [92].

Из перечисленных элементов наиболее подвержены неисправностям форсунки и ТНВД. Наиболее эффективным на данный момент средством для встроенного диагностирования является накладной датчик, информация от которого обрабатывается и поступает на дисплей прибора. По частоте вращения и ее снижению можно судить о мощности двигателя и общем его состоянии. Обработка информации с датчиков систем смазки, охлаждения и топливной, позволит выявить с помощью логического метода предельные состояния двигателя и своевременно провести профилактические работы [4, с. 69].

Правильность диагноза требует большого количества информации, поэтому методы, используемые в настоящее время неэффективны. Предложенный нами вероятностно-логический метод основывается на взаимосвязанности неисправностей и позволяет диагностировать систему с помощью минимально необходимого количества датчиков для получения достоверной информации. Данная модель позволяет использовать совокупность недорогих, но эффективных действий для качественного диагностирования при минимальных затратах. Диагностика не только правильно подобранный метод контроля параметров, но и диагностическое оборудование, позволяющее провести его внедрение на АТП.

1.6. Классификация контрольно-измерительных приборов

Автомобильные контрольно-измерительные приборы (КИП) по способу отображения информации, которую они представляют водителю, разделяют на две группы: указывающие и сигнализирующие (рис. 1.9).

Указывающие приборы имеют шкалу и стрелку, по положению которой относительно шкалы определяется значение измеряемой величины. Чтобы оценить измеряемую величину, водитель должен отвлечься на некоторое время от наблюдения за движением автомобиля, посмотреть на шкалу прибора и осознать показание. Давая водителю информацию о контролируемом параметре во всем диапазоне измерения шкалы, указывающий прибор позволяет судить о состоянии контролируемого узла или системы автомобиля [91].

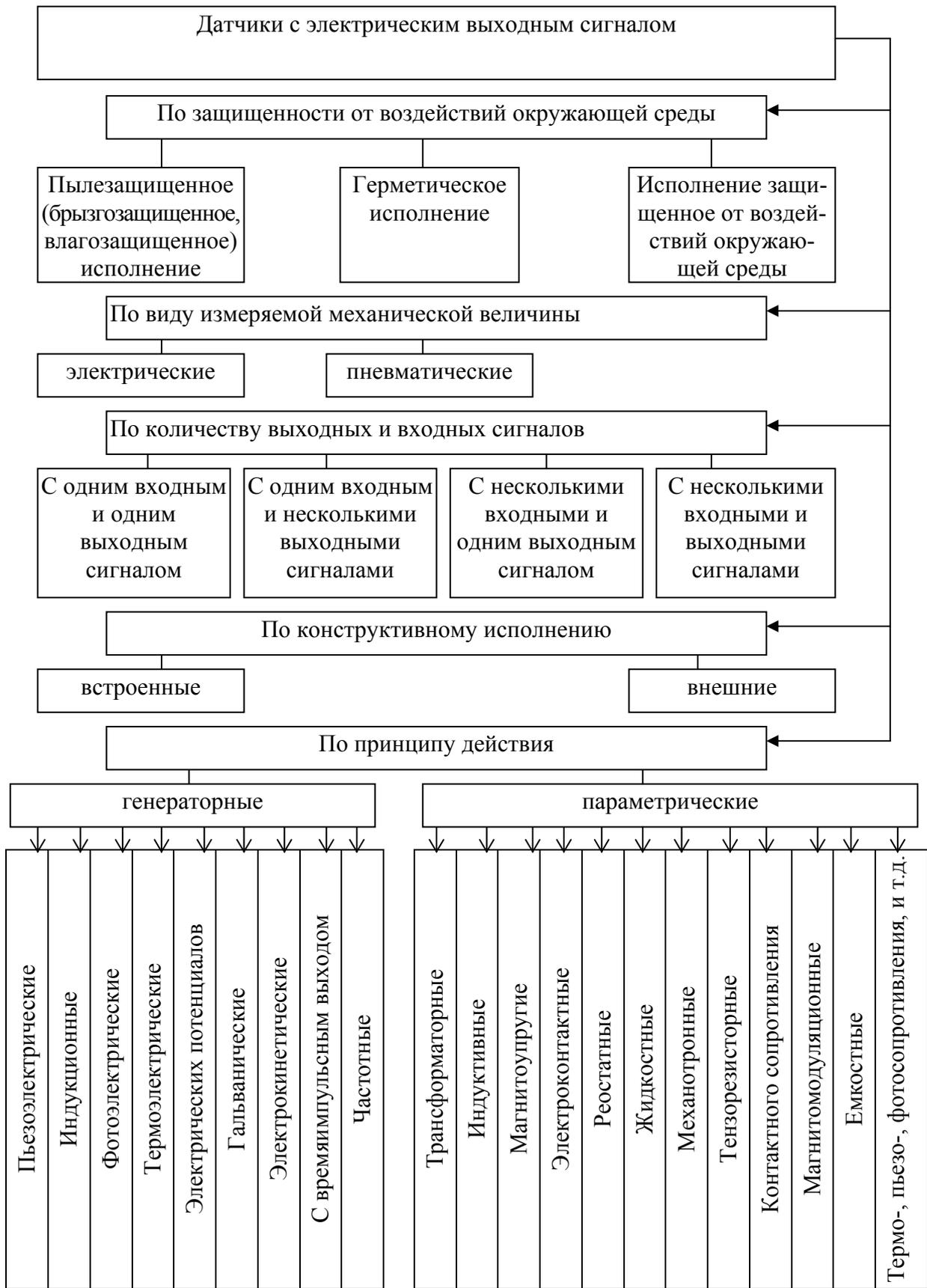


Рис. 1.9. Классификация датчиков с электрическим выходным сигналом

Сигнализирующие приборы (сигнализаторы) реагируют лишь на одно, как правило, аварийное значение измеряемого параметра и информирует об этом световым или звуковым сигналом. Сигнализатор удобен для водителя, поскольку не требует от него постоянного наблюдения и меньше отвлекает от процесса управления автомобилем. Однако информации от сигнализатора поступает к водителю тогда, когда нормальный режим уже нарушен или близок к нарушению [79, с. 33]. В настоящее время на всех типах автомобилей наблюдается тенденция к увеличению количества сигнализирующих приборов.

Автомобильные приборы разделяют на электрические и механические.

Электрические приборы питаются от бортовой электрической сети автомобиля. Механические же приборы дают показания, используя энергию измеряемой среды (например, манометры для измерения давления в системе смазки). Преимуществом электрических приборов, обеспечившим им широкое распространение на автомобилях, является простота передачи сигналов с места контроля к месту наблюдения [28].

По назначению все контрольно-измерительные приборы автомобилей разделяют на следующие группы: измерения температуры (термометры); измерения давления (манометры); измерения уровня топлива; контроля зарядного режима аккумуляторной батареи; измерения скорости автомобиля и пройденного пути (спидометры); измерения частоты вращения (тахометры) [82, с. 57].

Классификация датчиков. Важнейшим функциональным элементом электронных средств технического диагностирования автомобилей являются датчики (первичные преобразователи) электрических и неэлектрических физических величин. Правильный выбор типа датчика непосредственно влияет на качество получаемой диагностической информации, достоверность постановки диагноза, экономические показатели процесса диагностирования [65, с. 307].

Датчик – устройство, воспринимающее измеряемый (контролируемый) параметр и преобразующий его в сигнал, удобный для передачи по линиям связи, дальнейшего преобразования, обработки или хранения, но не поддающийся непосредственному восприятию наблюдением [65, с. 308].

В целом по виду измеряемой величины выходной сигнал датчика может быть электрический, пневматический, гидравлический, механический и др. В средствах технического диагностирования автомобилей наиболее широко применяют датчики с электрическим выходным сигналом. Преимущества таких датчиков заключается в быстрой реакции, возможности автоматизации процесса измерения, многофункциональности и гибкости [36].

В зависимости от принципа действия датчики с электрическим выходным сигналом можно разделить на две основные категории: генераторные (активные) и параметрические (пассивные) [48].

В **генераторных датчиках** осуществляется генерация электрической энергии, т.е. преобразование измеряемого параметра в электрический сигнал. К генераторным датчикам относят пьезоэлектрические, индукционные, фотоэлектрические, гальванические, электрокинетические, частотные датчики, а также датчики электрических потенциалов и датчики с времяимпульсным выходом.

В **параметрических датчиках** измеряемая величина преобразуется в параметр электрической цепи: сопротивление, индуктивность, емкость и т.п.

Такие датчики питаются от внешнего источника электрической энергии. К параметрическим датчикам относят емкостные, электромагнитные и магнитоэлектрические, тензорезисторные, магнитомодуляционные датчики, а также датчики контактного сопротивления, и др. (табл. 1.3). Из перечисленной номенклатуры датчиков в средствах технического диагностирования машин практически применяются потенциометрические, индуктивные, трансформаторные, магнито-упругие и другие датчики [36].

Т а б л и ц а 1.43

Области применения датчиков в СТД

Наименование датчиков	Измеряемые величины
1	2
Потенциометрические	Абсолютное и избыточное давления жидких и газообразных сред, перепады давлений, различные перемещения, скорость, ускорение, и др.
Тензорезисторные	Давление, усилие, вращающий момент, относительное перемещение, линейное ускорение и др.
Наименование датчиков	Измеряемые величины
Электроконтактные	Временные интервалы и фазовые параметры и др.
Индуктивные	Давление, линейные перемещения и др.
Трансформаторные	Давление и расходы жидких и газообразных веществ, линейные перемещения и др.
Магнитоупругие	Усилие, вращающий момент и др.
Индукционные	Расход жидкости и газа, частота вращения и др.
Пьезоэлектрические	Давление, вибрация, расход и уровень жидкости, фиксация моментов включения и выключения и др.
Термосопротивления	Температуры жидких и газообразных сред и корпусных поверхностей и др.
Фотоэлектрические	Частота вращения, вращающий момент, линейные и угловые размеры и др.
Механотронные	Усилие, давление, малые перемещения и др.

По конструктивному исполнению датчики систем и средств технического диагностирования автомобилей подразделяют на **встроенные**, являющиеся неотъемлемой частью диагностируемого автомобиля, и **внешние**, которые устанавливают на автомобиль лишь на период диагностирования.

По количеству входных и выходных сигналов различают датчики с одним входным и одним выходным сигналами; с одним входным и несколькими выходными сигналами; с несколькими входными и одним выходным сигналами; с несколькими входными и несколькими выходными сигналами [47, с. 126].

Требования к датчикам. Условия работы датчиков при диагностировании автомобилей резко отличается от условий работы вторичной аппаратуры СТД, преобразующей и обрабатывающей выходные сигналы датчиков. Особенно тяжелые условия работы у встроенных датчиков, которые должны иметь более высокие показатели надежности, чем диагностируемые объекты, сохранять свою работоспособность при значительных перепадах температур, вибрациях, повышенной запыленности, ударных нагрузках. Встроенные датчики не должны менять свои выходные характеристики при воздействии на них агрессивных сред, например масел, бензина и других жидкостей [51].

Датчики обыкновенного исполнения не применяют в условиях интенсивных механических и температурных воздействий, в запыленной, влажной и взрывоопасной средах.

Датчики температуропропрочного исполнения рассчитывают чаще всего на воздействие температур от -50°C (при хранении и транспортировки СТД) до $+200^{\circ}\text{C}$, а температуроустойчивого исполнения – от -30 до $+100^{\circ}\text{C}$ (встроенные) и от $+10$ до 100°C (внешние).

Датчики должны изготавливаться с унифицированными разъемами для подключения их к СТД, а внешние датчики, кроме того, должны иметь унифицированные устройства, обеспечивающие их быструю и удобную установку и фиксацию на диагностируемом объекте [49].

Датчики с одинаковым принципом действия, предназначенные для измерения однотипных диагностических параметров, должны быть унифицированы и, в первую очередь, по выходному сигналу.

Датчик, установленный в исправном или неисправном состоянии на объект диагностирования, не должен отрицательно влиять на его работу. Установка датчика должна производиться с минимальными затратами времени, труда и средств, а процесс диагностирования по выходному сигналу датчика должен быть кратковременным [81, с. 42-45].

Датчик СТД в зависимости от назначения могут работать в статистическом, динамическом и статодинамическом процессах. При *статистиче-*

ском процессе к датчикам предъявляют метрологические требования по порогу чувствительности, зоне нечувствительности, стабильности выходной характеристики, вариации выходного сигнала. В целом комплексы метрологических характеристик СТД и их датчиков выбирают из числа характеристик, приведенных в ГОСТ 8.009-84, и указывают вместе с их допускаемыми значениями в нормативно-технической документации на СТД [25].

Порог чувствительности датчика – минимальное изменение измеряемой величины, вызывающее изменение выходного сигнала датчика.

Зона чувствительности датчика – максимальное изменение контролируемой величины, не вызывающее изменение выходного сигнала.

Чувствительность датчика – отношение изменения выходного сигнала к вызывающему его изменению измеряемой величины. Чувствительность регламентируется государственными стандартами.

Стабильность выходной характеристики – свойство датчика, отражающее неизменность во времени его метрологических свойств. Она не должна выходить за пределы основной допустимой погрешности.

Вариация выходного сигнала – средняя разность между значениями выходного сигнала. Вариация выходного сигнала не должна превышать основной допустимой погрешности.

При *динамическом процессе* к датчикам предъявляют дополнительные требования. Они должны обладать повышенной механической погрешностью. Чтобы предотвратить искажение результатов измеряемой величины, необходимо учитывать возможное влияние собственных колебаний упругой механической системы датчика. Частота собственных колебаний датчика должна превышать частоту контролируемого процесса по меньшей мере в 6–10 раз [55].

При *статодинамическом процессе* к датчику предъявляют дополнительно к перечисленным следующие требования по однонаправленности действия, перегрузочной способности датчика и его избирательности.

Однонаправленность действия – это сведение к минимуму обратного силового воздействия от датчика на контролируемый процесс.

Перегрузочная способность датчика характеризуется отношением предельного значения измеряемого параметра к его номинальному значению. Перегрузочная способность датчиков обычно равна 1,5–2 от рабочего диапазона измеряемой величины.

Избирательность датчика характеризует его способность реагировать только на изменение того параметра, для измерения которого он предназначен [50, с. 296].

Важное значение имеют требования к показателям надежности датчиков: безотказности, долговечности, вероятности безотказной работы, интенсивности потока отказов. Показатели надежности датчиков должны

быть значительно выше показателей надежности СТД, для которых они предназначены. Если датчики встроенные, то их надежность должна быть выше надежности диагностируемого объекта [13, с. 184].

Значение наработки на отказ при ее нормировании в НТД выбирают из ряда 500, 600, 700, 800, 900, 1000 ч и далее через каждые 250 ч. Нормируемые показатели надежности датчиков определены в ГОСТ 27.003–83. Периодичность проверки датчиков задается в НТД [13, с. 184].

По мере того как снижаются цены, ужесточаются правительственные требования к топливной экономичности и чистоте отработавших газов, растет потребность в датчиках электронных систем и расширяется их рынок.

Все определяется не только стоимостью, но и требованиями интегрирования датчиков в систему. Чтобы резко снизить себестоимость всех составных частей электронных систем (микропроцессоров, датчиков), нужно создавать заново систему в целом. Но автомобильная промышленность развивается эволюционным путем, а не революционным. Для создания «авангардной» технологии необходимо 8–10 лет, в то время как применение традиционной для налаживания серийного производства новой электронной системы требуется только 4 года [56, с. 127].

В большинстве случаев цену на новую продукцию удастся снизить благодаря расширению объемов выпуска и приобретению опыта. Но это затрудняет в дальнейшем перевод принятой технологии на новую основу, продлевая жизнь старой, но отлаженной. Это имеет положительную сторону. С ростом применения датчиков в автомобильных электронных системах теряет значение то, какая технология является лучшей в конкретном случае и даже какое количество датчиков и какая стратегия управления всей системой будет необходима в будущем [55, с. 42].

Сегодня полупроводниковые датчики считаются новым компонентом, их достоинством является преобразование синусоидального сигнала в серии прямоугольных импульсов. Микропроцессоры могут воспринимать только логические единицы и нули. Поэтому на выходе синусоидальный сигнал необходимо сравнивать с пороговой величиной и в период, когда его уровень превышает пороговую величину, меньше порогового значения – единице. А частота импульсов характеризует скорость процесса [56 с. 17-20].

Следующий шаг – обеспечение предварительной обработки сигнала перед подачей его в контроллер системы. Такие так называемые «интеллектуальные» датчики освободят центральный контроллер от предварительных вычислений, расширяя его возможности для реализации алгоритма управления и распределения информации между системами. «Интеллектуальные» датчики, вероятно, не будут непосредственно распределять информацию. Многие пользователи, подключая к одному датчику несколько систем, затрудняют его функционирование [73].

Интеллектуальные датчики будут следующим шагом вперед. Заказчики требуют от будущих датчиков способности к самодиагностике, распознаванию сбоев и ложных сигналов, удобства технического обслуживания. В настоящее время особенно растет потребность в приборах измерения ускорений – акселерометрах. В некоторых (но не во всех) случаях акселерометры могут быть заменены оптическими датчиками. Основанные на использовании инфракрасных излучателей (светоизлучающих диодах) и детекторов, эти оптические датчики могут быть использованы для измерения скорости автомобиля, его положения и высоты, уровней жидкостей в гидросистемах и светового потока, для определения состава рабочей смеси в случае многотопливного двигателя [82].

Однако широкого распространения оптические датчики не получают до освоения волоконно–оптической технологии и мультиплексирования. До того времени оптические датчики будут применяться в тех случаях, когда они имеют очевидные функциональные или экономические преимущества.

В настоящее время имеется, однако, одна технология, которая может быть использована практически во всех существующих электронных системах – это полимерные толстые пленки (РТФ) с электропроводящими наполнителями (серебром, углеродом, никелем, медью) [67].

В новейших системах управления надувными подушками безопасности для измерения ударного воздействия используются акселерометры, установленные непосредственно в блоке управления, расположенном в салоне водителя. Это исключает необходимость иметь множество внешних датчиков (неэлектронные системы обычно содержат 4–5 механических датчиков), сокращает длину проводов и объем требуемого для размещения системы пространства. Снижается также и время срабатывания подушки. Механическая система обеспечивала время срабатывания около 22 мс, сейчас это время составляет 17,5 мс [71, с. 6].

Но акселерометры используются не только в системах управления подушками. Они могут применяться также в антиблокировочных системах (АБС), системах регулирования тягового условия (РТУ), в активных и полуактивных подвесках, навигационных системах и системах контроля детонации в двигателе. А новое поколение миниатюрных датчиков – трехмерные структуры, выполнение в кремнии, могут получить применение в новых областях. В системе с акселерометрами, измеряющими ускорения вертикальных перемещений колес (например, в активных подвесках), и датчиками, измеряющими воздействие водителя на рулевое колесо, можно определять поперечное ускорение без использования сигнала другого акселерометра для управления АБС и системой РТУ. В ближайшие годы наблюдается рост числа датчиков на автомобиле, но долгосрочная тенденция пока не ясна [27].

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТКР В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

2.1. Основные понятия и определения, используемые при теоретических исследованиях

Основное назначение технической диагностики сельскохозяйственной техники, как известно, состоит в повышении её надежности на этапе эксплуатации [2, 20]. Кроме того, диагностическое обеспечение позволяет также получать высокие значения достоверности правильного функционирования объектов. Объектом исследования является турбокомпрессор двигателей мобильной сельскохозяйственной техники.

Введем следующее определение состояния объекта исследования [79]. Турбокомпрессор считается исправным (находится в исправном состоянии), если он удовлетворяет всем требованиям нормативно-технической документации. Убедиться в исправности ТКР необходимо после его изготовления и после ремонта.

Для условий эксплуатации важным является понятие работоспособного технического состояния турбокомпрессора. ТКР работоспособен, если он может выполнять все заданные ему функции с сохранением значений заданных параметров (признаков) в требуемых пределах. Убедиться в работоспособности объекта необходимо, например, при его профилактике, после транспортирования и хранения. Для этапа применения по назначению существенным является понятие технического состояния правильного функционирования объекта (ТКР). Правильно функционирующим является турбокомпрессор, значения параметров (признаков) которого в текущий момент реального времени применения ТКР по назначению находится в требуемых пределах (в этот момент времени объект не отказал, т.е. правильно выполняет конкретную заданную функцию). Неисправное и неработоспособное техническое состояние, а также техническое состояние неправильного функционирования объекта (ТКР) детализируются путём указания соответствующих дефектов, нарушающих исправность, работоспособность или правильность функционирования и относящихся к одной или нескольким составным частям турбокомпрессора, либо ТКР в целом. Обнаружение поиска дефектов являются процессами определения технического состояния ТКР и объединяются общим термином «диагностирование». Диагноз есть результат диагностирования. Таким образом, задачами диагностирования являются задачи проверки исправности, работоспособности и правильности функционирования ТКР, а также задачами поиска дефектов, нарушающих исправность, работоспособность или правильность функционирования.

2.2. Исходные взаимосвязи параметров турбокомпрессора и показателей работы двигателя

Как было установлено ранее, показатели работы турбокомпрессора оказывают существенное влияние на показатели эффективности работы двигателя в составе мобильного сельскохозяйственного агрегата [73].

Тесная их взаимосвязь обуславливает необходимость обоснования предельных значений показателей функционирования ТКР, при достижении которых дальнейшая эксплуатация дизеля должна быть приостановлена до выявления причин появления отказа. Решение подобной задачи возможно на основании математической модели взаимосвязи показателей двигателя и турбокомпрессора.

Турбокомпрессор представляет собой единый агрегат, состоящий из турбинного и компрессорного колёс, закреплённых на общем валу. Турбина приводится в действие энергией выпускных газов и обеспечивает воздухообеспечение двигателя. При подобной схеме газотурбинного наддува между турбиной и компрессором помимо механической имеется газовая связь, автоматически изменяющая параметры турбины, а, следовательно, и компрессора при изменении мощности дизельного двигателя. Преимущества такой схемы очевидны. Главный же недостаток её состоит в том, что эффективно функционировать она может только при взаимосвязях, характерных для технически исправных отдельных её элементов на режимах, установленных заводом-изготовителем. Неисправность в любом из элементов, постепенно накапливающаяся в процессе эксплуатации и внешне заметно не проявляющаяся, на определенных режимах работы может привести к внезапному их отказу. Сложность диагностирования такой системы с целью оценки её работоспособности заключается в том, что показатели функционирования турбокомпрессора в эксплуатации изменяются, как в зависимости от технических и режимных характеристик самого двигателя, так и от технических и режимных характеристик турбокомпрессора. Выявление характерных параметров ТКР определяющих правильность его функционирования, является первостепенным в условиях эксплуатации.

Как показали проведённые ранее исследования [65, 95], важным параметром, характеризующим работоспособность ТКР является давление наддувочного воздуха P_k . Взаимосвязь P_k с показателями двигателя устанавливается выражением [74, 129]:

$$P_k = \frac{\alpha L_0 P_e g_e T_k}{318,4 \eta_H}, \quad (2.1)$$

где α – коэффициент избытка воздуха, на номинальном режиме автотракторных дизелей с неразделенными камерами сгорания $\alpha = 1,5 - 1,8$;

L_0 – количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания 1 кг топлива, $L_0 = 0,459$ кмоль/кг; P_e – среднее эффективное давление, МПа; g_e – удельный эффективный расход топлива, г/кВт·ч; T_k – температура надвучного воздуха, К; η_n – коэффициент наполнения, $\eta_n = 0,85 - 0,95$ [5].

По зависимости (2.1) можно определить давление наддува, необходимое для достижения определенных показателей P_e и g_e . При практических расчетах компрессора, как машины, способной нагнетать воздух под давлением, параметр P_k может быть определен из уравнения адиабатной работы сжатия воздуха в компрессоре [6]:

$$L_{k\text{ ад}} = \frac{K}{K-1} R T_a \left[\left(\frac{P_k}{P_a} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right], \quad (2.2)$$

где K – показатель адиабаты сжатия, для центробежных компрессоров можно принять $K = 1,4$; R – газовая постоянная воздуха, $R = 29,27$ кг·с·м/кг·°С.

Действительная работа компрессора:

$$L_k = \frac{L_{k\text{ ад}}}{\eta_k}, \quad (2.3)$$

где η_k – общий КПД компрессора.

$$\eta_k = \eta_{k\text{ ад}} \cdot \eta_{k\text{ м}}, \quad (2.4)$$

где $\eta_{k\text{ ад}}$ – адиабатный КПД компрессора; $\eta_{k\text{ м}}$ – механический КПД компрессора.

Расход воздуха через компрессор связан с массовым расходом воздуха двигателя следующим уравнением:

$$G_k = \frac{g_e N_e}{3600} \cdot \alpha \cdot L_0 \cdot \varphi_a, \quad (2.5)$$

где N_e – эффективная мощность, кВт; φ_a – коэффициент продувки.

Мощность компрессора, необходимая для обеспечения оптимального расхода воздуха двигателем, может быть определена по формуле

$$N_k = \frac{G_k \cdot L_{k\text{ ад}}}{75 \eta_k}. \quad (2.6)$$

При свободном турбокомпрессоре имеет место баланс мощностей

$$N_t = N_k. \quad (2.7)$$

Мощность турбины N_t определяется адиабатной работой расширения газов в турбине и рассчитывается по выражению:

$$N_t = \frac{G_{tч} \cdot L_{тад} \cdot \eta_t}{75}, \quad (2.8)$$

где $G_{tч}$ – расход газов через турбину, кг/ч; $L_{тад}$ – адиабатная работа расширения газов; η_t – общий КПД турбины.

Массовый расход газов через турбину на любом режиме зависит от суммарного расхода воздуха G_k и топлива G_t и может быть определен по зависимости:

$$G_{tч} = \frac{g_e N_e}{3600} \cdot (1 + \alpha \cdot L_0 \cdot \phi_a). \quad (2.9)$$

При практических расчетах допускается соотношение [71]:

$$G_{tч} \approx (1,03 \div 1,04) G_k. \quad (2.10)$$

Адиабатную работу расширения газов в турбине представим выражением:

$$L_{та} = \frac{K}{K-1} R T_t \left[1 - \left(\frac{P_z}{P_t} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right], \quad (2.11)$$

где K – показатель адиабаты расширения газов, для центробежных турбин можно принять $K \approx 1,35$; R – газовая постоянная, $R = 29,27$ кг·с·м/кг·°С; T_t – температура газов перед турбиной, °С.

Общий КПД турбины:

$$\eta_t = \eta_{та} \cdot \eta_{тм}, \quad (2.12)$$

где $\eta_{та}$ – адиабатный КПД турбины; $\eta_{тм}$ – механический КПД турбины.

Составляющие уравнения баланса мощностей (2.7) после преобразования запишем в виде:

$$N_t = \frac{G_{tч} \cdot \eta_t}{75} \cdot \frac{K}{K-1} R_1 T_t \left[1 - \left(\frac{P_z}{P_t} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]. \quad (2.13)$$

Мощность, требуемая для привода компрессора:

$$N_k = \frac{G_{kч}}{75 \cdot \eta_k} \cdot \frac{K}{K-1} R_1 T_t \left[1 - \left(\frac{P_k}{P_0} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right]. \quad (2.14)$$

С другой стороны, в условиях эксплуатации мощность $N_{tэ}$ развиваемая турбиной, может быть определена по выражению:

$$N_{tэ} = C \cdot M_{tэ} \cdot n_{tэ}, \quad (2.15)$$

где C – постоянный коэффициент, ($C=1/9550$); $M_{tэ}$ – момент сопротивления вращению турбине, Н·м; $n_{tэ}$ – эксплуатационная частота вращения ротора ТКР, об/мин.

Выразим из выражения (2.15) момент сопротивления вращению турбине:

$$M_{tэ} = \frac{N_{tэ}}{C \cdot n_{tэ}}. \quad (2.16)$$

Правильность функционирования ТКР в эксплуатации определяется соотношением:

$$\frac{M_t}{M_{tэ}} = \frac{\frac{N_t}{C \cdot n_t}}{\frac{N_{tэ}}{C \cdot n_{tэ}}}, \quad (2.17)$$

где M_t – значение крутящего момента, определяемое из выражения (2.13), Н·м; n_t – значение частоты вращения ротора ТКР, определяемое на основании выражения (2.13) $n_t = \frac{N_t}{M_t \cdot C}$, об/мин.

Преобразовав выражение (2.17), получим:

$$\frac{M_t}{M_{tэ}} = \frac{n_{tэ}}{n_t}. \quad (2.18)$$

Если $\frac{n_{tэ}}{n_t} = 1$, то техническое состояние ТКР соответствует правильному его функционированию.

Если $\frac{n_{tэ}}{n_t} < 1$, то в эксплуатации имеет место снижение скоростного режима ТКР по причине повышенного сопротивления вращению, либо наличия гидравлических утечек, что должно быть непременно служить предметом поиска дефекта методом диагностирования. При $\frac{n_{tэ}}{n_t} > 1$ будет иметь место нарушение нормального функционирования ТКР, из-за «перекрутки» турбины вследствие неисправности в системе управления турбокомпрессором, что также является предметом поиска неисправностей методом диагностирования.

Таким образом, контроль частоты вращения турбокомпрессора в эксплуатации является необходимым условием оценки правильности его функционирования в составе двигателя мобильной сельскохозяйственной техники.

Предложенный автором способ контроля n_{tk} (патент РФ на полезную модель №145761 от 24.12.2013 г.) позволил разработать основы метода оценки работоспособности ТКР по его динамическим (разгонным) характеристикам. Основные теоретические предпосылки данной методики изложены в следующем параграфе.

2.3. Оценка правильности функционирования ТКР по его динамическим характеристикам

Как отмечалось выше, на переходных режимах имеет место запаздывание воздухоподачи относительно подачи топлива по причине инерционности ротора турбокомпрессора. Инерционные свойства турбокомпрессора определяются его конструкцией и задаются в виде момента инерции J_{tk} .

На практике инерционные свойства наиболее полно могут быть проанализированы по разгонным характеристикам ТКР (рис. 2.1) [177]. Обычно для технически исправных ТКР время разгона от минимальной частоты вращения n_{min} до максимальной n_{max} составляет от 2 до 3 секунд (рис. 2.1, кривая 1).

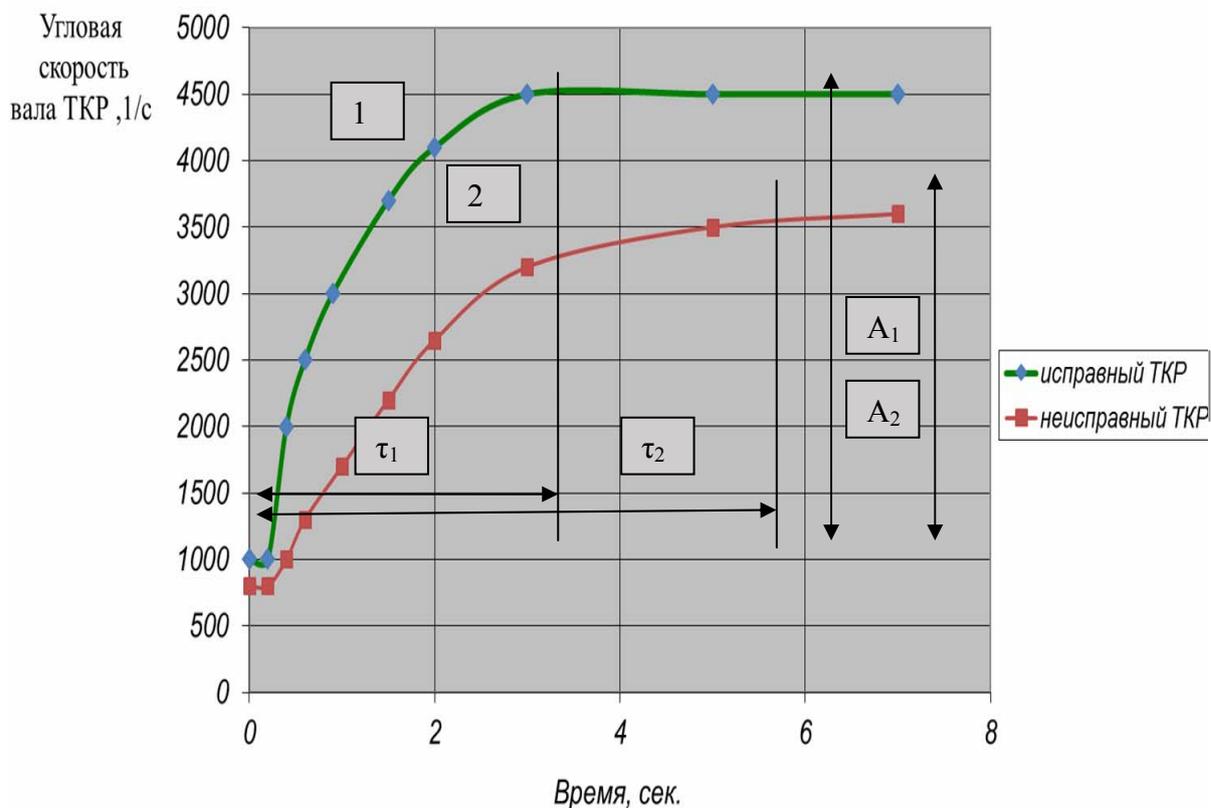


Рис. 2.1. Разгонные характеристики турбокомпрессора

В случае нарушения нормального функционирования разгонные характеристики ТКР изменяются и принимают вид (рис. 2.1, кривая 2). Возрастание сопротивления вращению ротора ТКР приводит как к увеличению времени разгона (с $\tau_1 = 3$ с до $\tau_2 = 5,5$ с), так и снижению абсолютных значений угловой скорости (с $\omega_1 = 4500$ с⁻¹ до $\omega_2 = 3600$ с⁻¹).

Определение разгонных характеристик ТКР с помощью разработанного средства диагностического контроля (патент на полезную модель РФ №145761 от 24.12.2013 г.) может быть положено в основу разработки метода диагностирования ТКР по его динамическим характеристикам [22, 178].

Теоретические предпосылки к разработке предлагаемого метода излагается ниже.

Уравнение движения турбокомпрессора при разгоне [154]:

$$M_{jtk} + M_k - M_t = 0, \quad (2.19)$$

где M_{jtk} – момент сил инерции ротора турбокомпрессора; M_k – момент, расходуемый на привод компрессора, включающий механические потери; M_t – момент, развиваемый турбиной.

$$M_{jtk} = J_{tk} \frac{\pi}{30} \cdot \frac{dn_{tk}}{d\tau}, \quad (2.20)$$

где J_{tk} – момент инерции ротора турбокомпрессора; n_{tk} – частота вращения ротора турбокомпрессора.

На переходных режимах работы турбокомпрессора ускорение ротора турбокомпрессора выразим следующим уравнением:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{M_{jtk}}{J_{tk}}, \quad (2.21)$$

После выхода на установившийся режим, когда $\frac{d\omega}{d\tau} = 0$, уравнение движения ротора турбокомпрессора принимает следующий вид:

$$M_t = M_k, \quad (2.22)$$

$$M_{jtk} = 0. \quad (2.23)$$

Допускаем, что при постоянном количестве газа, поступающим в турбину, крутящий момент M_t является линейной функцией окружной скорости колеса, и следовательно, угловой скорости ω :

$$M_t = A - B\omega. \quad (2.24)$$

При $\omega = 0$:

$$M_t = M_{t\max} = kM_{tn}, \quad (2.25)$$

где k – коэффициент, учитывающий отношение $\frac{M_{t\max}}{M_{tn}}$.

С другой стороны установлено, что момент, необходимый для привода компрессора в условиях разгонной характеристики, является функцией квадрата угловой скорости ротора:

$$M_k = c\omega^2. \quad (2.26)$$

При ω_n момент $M_k = M_m$. Тогда на основании уравнений (2.21) и (2.26) можно записать:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{M_m}{J_{tk}} \left[k - (k-1) \frac{\omega}{\omega_n} - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right]. \quad (2.27)$$

Проинтегрировав уравнение (2.27), получим, выражение времени разгона ротора турбокомпрессора в следующем виде:

$$t = \frac{J_{tk}\omega_n}{M_m(k+1)} \ln \frac{\omega_n + \frac{\omega}{k}}{\omega_n - \omega} + c_1. \quad (2.28)$$

Постоянная c_1 может быть определена из начальных условий при $t = 0$, $\omega = 0$:

$$c_1 = -\frac{J_{tk}\omega_n}{M_m(k+1)} \ln(-k). \quad (2.29)$$

Подставим c_1 в уравнение (2.29), получим окончательную формулу для определения времени разгона ротора турбокомпрессора:

$$t = \frac{J_{tk}\omega_n}{M_m(k+1)} \ln \frac{\omega_n + \frac{\omega}{k}}{\omega_n - \omega}. \quad (2.30)$$

Преобразовав уравнение (2.30), получим зависимость угловой скорости от времени разгона (2.31):

$$\omega = \omega_n \frac{e^{\frac{M_m(k+1)}{J_{tk}\omega_n} t} - 1}{e^{\frac{M_m(k+1)}{J_{tk}\omega_n} t} + \frac{1}{k}}. \quad (2.31)$$

Таким образом, алгоритм расчета разгонных характеристик ТКР сводится к выполнению операций выбора значений ω_n , J_0 , M_m по данным завода-изготовителя, и для задаваемых отсчетов времени определению угловых скоростей ω ротора ТКР.

Результаты расчета представлены на графике (рис. 2.2). Как видно из графиков для ТКР-6 разгонные характеристики исправного ($\eta_{tk} = 0,4$) и неисправного ($\eta_{tk} = 0,3$) различаются как по времени разгона, так и абсолютному значению n_{tk} установившегося движения после разгона: $t_1=3,5$, $t_2=5,5$; $\omega_1=105000$ об/мин, $\omega_2=86000$ об/мин.

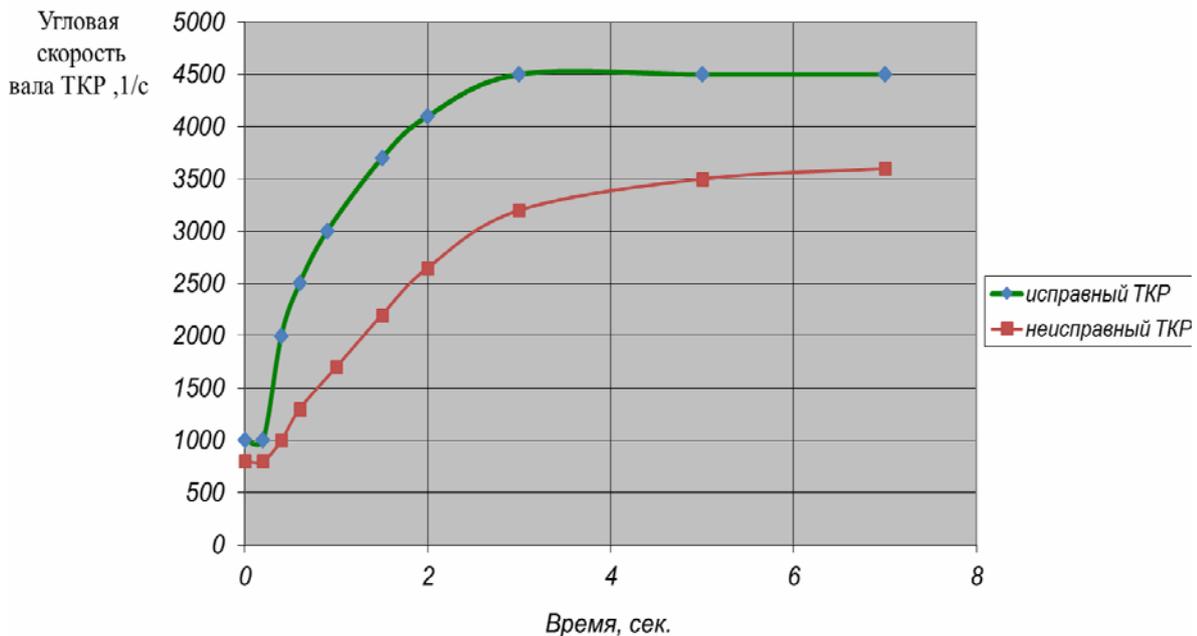


Рис. 2.2. Разгонные характеристики турбокомпрессора

2.4. Оценка правильности функционирования ТКР по составляющим его КПД

Анализ выражений (2.13) и (2.14) показывает, что энергетические характеристики турбины и компрессора зависят от их КПД. Составляющими элементами, снижающими данные КПД, являются потери, вызванные перетеканием газов в лопаточных частях компрессора и турбины, что учитывается соответственно в η_{ka} КПД компрессора и η_{ta} турбины.

Отдельные элементы затрат энергии на преодоление сопротивлений вращению компрессорного и турбинного колёс, учитываются соответственно механическим КПД компрессора и механическим КПД турбины. Следовательно, можно предположить, что закономерности изменения, указанных КПД могут характеризовать техническое состояние правильного функционирования ТКР в эксплуатации.

При испытаниях на двигателе непосредственное определение КПД турбины и компрессора определяют по средним параметрам состояния рабочего тела в ТКР. Для этого необходимо измерять как давления и температуры перед компрессором и турбиной, так и температуры, и давления за ними [6]:

$$\eta'_{tk} = 0,89 \frac{\overline{\Delta t_k T_a}}{\overline{\Delta t_t T_t}}, \quad (2.32)$$

где η'_{tk} – КПД турбокомпрессора, определенного в условиях моторных испытаний; $\overline{\Delta t_k}$ – среднее значение теплового перепада наддувочного воздуха, вызванное работой компрессора, $\overline{\Delta t_k} = \pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1$; $\overline{\Delta t_t}$ – среднее значение теплового перепада отработавших газов, вызванное работой турбины, $\overline{\Delta t_t} = 1 - \frac{1}{\pi_t^{\frac{k}{k-1}}}$; π_k – степень повышения давления наддувочного воздуха; π_t – степень понижения давления отработавших газов; T_a – абсолютная температура воздуха перед компрессором, К; T_t – абсолютная температура газа перед турбиной, К.

Коэффициент полезного действия турбины, можно определить с помощью следующего уравнения:

$$\eta_t = 0,89 \frac{\eta'_{tk}}{k'_N \eta_k}, \quad (2.33)$$

где k'_N – коэффициент учитывающий импульсность потока газов перед турбиной; η_k – КПД компрессора.

Коэффициент полезного действия компрессора, есть отношение адиабатного повышения температуры наддувочного воздуха, к действительному перепаду температур, формула (2.34):

$$\eta_k = \frac{\Delta t_k}{\Delta t_{ka}}, \quad (2.34)$$

где Δt_k – адиабатное повышение температуры воздуха в компрессоре; Δt_{ka} – действительный перепад температур воздуха в компрессоре.

Адиабатное повышение температуры воздуха в компрессоре, представляет собой произведение абсолютной температуры воздуха перед компрессором и среднего значения теплового перепада наддувочного воздуха, вызванного работой компрессора:

$$\Delta t_k = T_a \cdot \overline{\Delta t_k}, \quad (2.35)$$

Действительный перепад температур воздуха в компрессоре:

$$\Delta t_{ka} = T_k - T_a, \quad (2.36)$$

где T_k – абсолютная температура воздуха после компрессора, К.

Тогда с учетом выше указанных выражений уравнение (2.32) можно записать в следующем виде:

$$\eta'_{tk} = 0,89 \frac{T_a \left(\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{T_t \left(1 - \frac{1}{\pi_t^{\frac{k-1}{k}}} \right)}. \quad (2.37)$$

Уравнение (2.34) после преобразований принимает вид:

$$\eta_k = \frac{T_a \left(\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{T_k - T_a}. \quad (2.38)$$

Выражение коэффициента полезного действия турбины (2.33) после преобразований представим следующим образом:

$$\eta_t = \frac{T_t \left(1 - \frac{1}{\pi_t^{\frac{k-1}{k}}} \right)}{T_t - T_z}, \quad (2.39)$$

где T_z – абсолютная температура газа после турбины, К.

Механический КПД турбокомпрессора η_{tkm} для оценки правильного его функционирования выразим следующим уравнением:

$$\eta_{tkm} = \frac{\eta'_{tk}}{\eta_k \cdot \eta_t}. \quad (2.40)$$

Алгоритм расчета коэффициента полезного действия турбокомпрессора и его составляющих при оценке правильности его функционирования (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2014616619) приведен ниже на (рис. 2.3) [148].

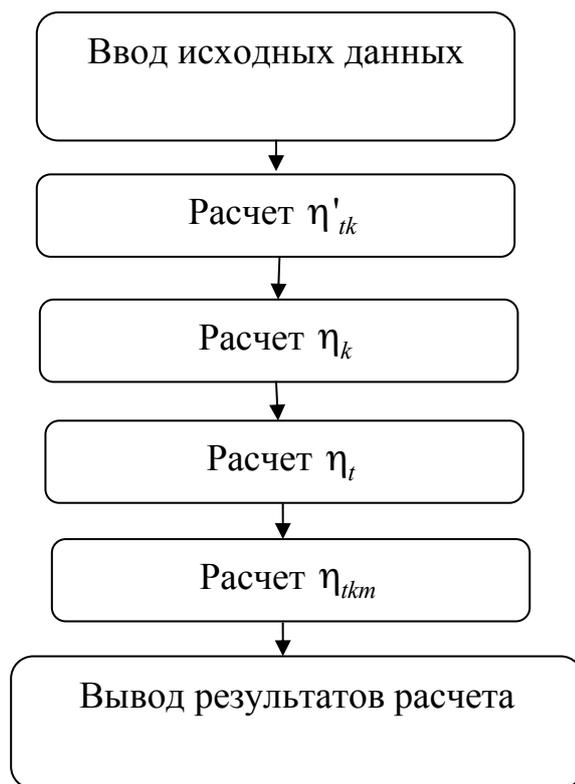


Рис. 2.3. Алгоритм расчета КПД турбокомпрессора

2.5. Обоснование границ исправного состояния ТКР

Как уже отмечалось выявление характерных функциональных параметров ТКР, определение их предельных значений и методов контроля является первостепенным при оценке технического состояния правильного функционирования ТКР в эксплуатации. Условием правильного функционирования ТКР является выполнение условия $\frac{n_{t2}}{t} = 1$, что на установившемся режиме подтверждается балансом мощностей $N_t = N_k$, определяемых по выражениям (2.13) и (2.14).

Уравнение баланса мощностей $N_t = N_k$ после преобразований можно записать в виде:

$$\left(\frac{P_k}{P_0}\right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 = \frac{K_1}{K_1 - 1} \cdot \frac{K-1}{K} \cdot \frac{R_1}{R_0} \cdot \frac{T_t}{T_0} \cdot \frac{G_t}{G_k} \cdot \eta_t \cdot \eta_k \left[1 - \left(\frac{P_z}{P_t}\right)^{\frac{K_1-1}{K_1}} \right].$$

Обозначим:

$$\frac{K_1}{K_1 - 1} \cdot \frac{K-1}{K} \cdot \frac{R_1}{R_0} = \beta;$$

$$\frac{T_t}{T_0} \cdot \frac{G_t}{G_k} = \tau.$$

Тогда:

$$\left(\frac{P_k}{P_0}\right)^{\frac{K-1}{K}} = \beta \cdot \tau \left[1 - \left(\frac{P_z}{P_t}\right)^{\frac{K_1-1}{K_1}}\right] \cdot \eta_{tk}. \quad (2.41)$$

Тогда из выражения (2.41) получим зависимость для расчета КПД турбокомпрессора в виде:

$$\eta_{tk} = \frac{\left(\frac{P_k}{P_0}\right)^{\frac{K-1}{K}}}{\beta \cdot \tau \left[1 - \left(\frac{P_z}{P_t}\right)^{\frac{K_1-1}{K_1}}\right]}. \quad (2.42)$$

Уравнение (2.42) устанавливает взаимосвязь между КПД турбокомпрессора и параметрами воздуха на впуске и параметрами газа на выпуске. Анализ выражения показывает, что снижение η_{tk} в эксплуатации относительно номинального значения может быть по причине:

- роста теплоперепада газов в турбине $\frac{T_t}{T_0}$;
- уменьшения степени повышения давления воздуха в компрессоре $\frac{P_k}{P_0}$;
- снижения степени расширения газа в турбине $\frac{P_z}{P_t}$;
- роста механических сопротивлений (снижения η_{tkm} , являющейся составляющей частью η_{tk}).

Учитывая, что в технически исправной системе ГТН, рост T_t происходит одновременно с повышением P_k за счет увеличения цикловой подачи топлива при повышении нагрузочного режима, по параметру T_t довольно проблематично аналитическим путем рассчитать предельные значения функциональных показателей ТКР (P_k ; P_t ; η_{tk}).

Сделаем попытку установления предельных показателей P_k , P_t , η_{tk} по более объективному критерию теплонапряженности цилиндропоршневой группы двигателя q_n [97, 89].

Запишем уравнение:

$$q_{\text{п}} = b \cdot C_m^{0,5} (p_e \cdot g_e \frac{T_k}{T_0})^{0,88} \cdot \left(\frac{D}{\eta_V \cdot P_k} \right)^{0,38}, \quad (2.43)$$

где b – коэффициент, учитывающий тактность двигателя, для четырехтактных двигателей $b = 1,0$; P_k – давление наддува воздуха, кг/см²; T_k – температура надувочного воздуха, К; C_m – средняя скорость поршня, м/с; D – диаметр цилиндра, дм; η_V – коэффициент наполнения, для двигателя Д-245-35 и турбокомпрессора ТКР 6,1 равен 0,95; p_e – среднее эффективное давление, кг/см²; g_e – удельный расход топлива, кг/(л.с.ч); T_0 – температура окружающего воздуха при нормальных условиях, $T_0 = 293$ К.

Как видно из формул, $q_{\text{п}}$ является комплексным критерием, учитывающим скоростной (C_m), нагрузочный (P_e) режимы работы двигателя, конструктивные параметры (D), параметры атмосферного и надувочного воздуха (T_0, T_k, P_k).

С помощью представленной выше зависимости (2.41) составим параметрическую модель взаимосвязи предельного давления наддува P_k и предельного давления P_t перед турбиной.

Выражение (2.41) будет в этом случае запишем в виде:

$$\left(\frac{P_{k \text{ пред}}}{P_0} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 = \rho \cdot \tau \left[1 - \left(\frac{P_{z \text{ пред}}}{P_{t \text{ пред}}} \right)^{\frac{K_1-1}{K_1}} \cdot \eta_{t \text{ к}} \right], \quad (2.44)$$

где $P_{t \text{ пред}}$ и $P_{z \text{ пред}}$ – предельные значения давления до и после турбины, кПа.

Предельное значение P_k получим из выражения (2.43):

$$P_k = \frac{b^{0,38} \cdot C_m^{0,38} \left(p_e g_e \frac{T_k}{T_0} \right)^{0,38} \cdot D}{q_{\text{п}}^{0,38} \eta_V}.$$

После преобразований, приняв $P_k = P_{k \text{ пред}}$, $b = 1$, получим:

$$P_{k \text{ пред}} = \frac{C_m^{1,32} \cdot \left(p_e g_e \frac{T_k}{T_0} \right)^{2,32} \cdot D}{q_{\text{п}}^{2,63} \cdot \eta_V}. \quad (2.45)$$

На основании выражения (2.42) предельное значение давления газов перед турбиной выразим зависимостью:

$$P_{t \text{ пред}} = \frac{P_{z \text{ пред}}}{1 - (\beta \cdot \tau \cdot \eta_{t \text{ к}})^{\frac{K_1}{1-K_1}} \cdot \left(\frac{P_{k \text{ пред}}}{P_0} \right)^{\frac{(K-1)K_1}{K(K_1-1)}}}, \quad (2.46)$$

где $P_{t \text{ пред}}$, $P_{z \text{ пред}}$ – предельные значения давления до и после турбины, кПа.

Подставив подсчитанные значения давления наддува P_k и давления отработавших газов P_t в формулу (2.42) получим зависимость предельного по теплонапряженности двигателя значения КПД турбокомпрессора η_{tk} от параметров, характеризующих правильность функционирования ТКР в эксплуатации (P_k, P_t, T_t).

$$\eta_{tk_пред} = \frac{\left(\frac{P_{k_пред}}{P_0}\right)^{\frac{K-1}{K}}}{\beta \cdot \tau \left[1 - \left(\frac{P_z}{P_{t_пред}}\right)^{\frac{K_1-1}{K_1}}\right]}. \quad (2.47)$$

Расчет предельных эксплуатационных параметров P_k, P_t и η_{tk} проводился с помощью контрольно-допусковой диагностической математической модели и алгоритма добавленного в программного обеспечения «Control MES» и «TURBOCOMP» [145, 146, 147]. Блок-схема алгоритма расчета представлена на рис. 2.4. Константы для расчета приняты, исходя из эксплуатационных параметров работы дизельного двигателя Д-245-35.

Допуски температуры наддувочного воздуха и температуры окружающей среды приняты из условий эксплуатации двигателя Д-245-35 и требований руководства по эксплуатации 245.7 – 0000100РЭ [38, 39]: $T_k = 393$ К, $T_0 = 293$ К. Градации P_k осуществлялись методом малых приращений [73]. По результатам расчетов получаем зависимость, представленную на рис. 2.5.

Анализируя полученную зависимость, можно сделать вывод, что на частотах вращения вала двигателя 800 и 1000 об/мин теплонапряженность практически не выходит за верхний предел $q_{п}=6$. На частотах вращения $n_{д}=1400$ об/мин при номинальной нагрузке предельное значение коэффициента полезного действия турбокомпрессора по критерию теплонапряженности двигателя составляет $\eta_{tk_пред} = 0,28$, на скоростном режиме двигателя $n_{д}=1800-2200$ об/мин $\eta_{tk_пред}$ находится в пределах $\eta_{tk_пред} = 0,35 - 0,36$.

Проведённые расчёты подтвердили выдвинутую ранее гипотезу о том, что при нагрузках, близких к номинальным, в случае появления «скрытых» отказов, связанных с нарушением воздухоподачи, критерий теплонапряженности $q_{п}$ может превышать предельно допустимое значение. Одним из показателей, характеризующим правильность функционирования двигателя, является η_{tk} . Значение КПД ТКР, соответствующее предельному критерию теплонапряженности $q_{п}=6$, на скоростном режиме двигателя $n_{д}=1800-2200$ об/мин находится в пределах $\eta_{tk} = 0,35 - 0,36$.

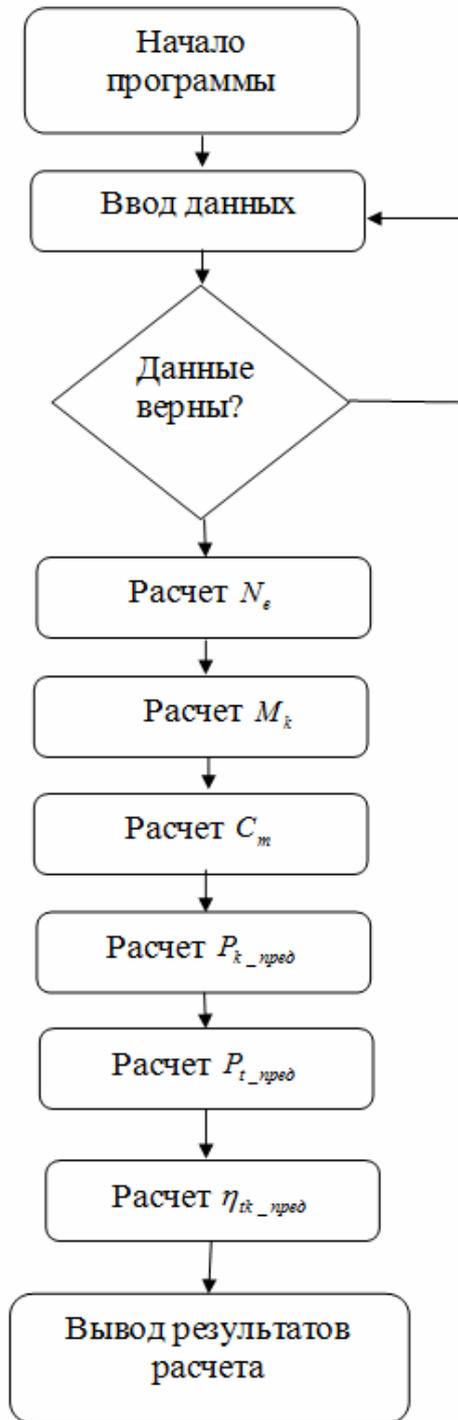


Рис. 2.4. Упрощенная блок-схема программы расчета предельных значений $P_{k_пред}$, $P_{t_пред}$, $\eta_{tk_пред}$ по критерию теплонапряженности поршня

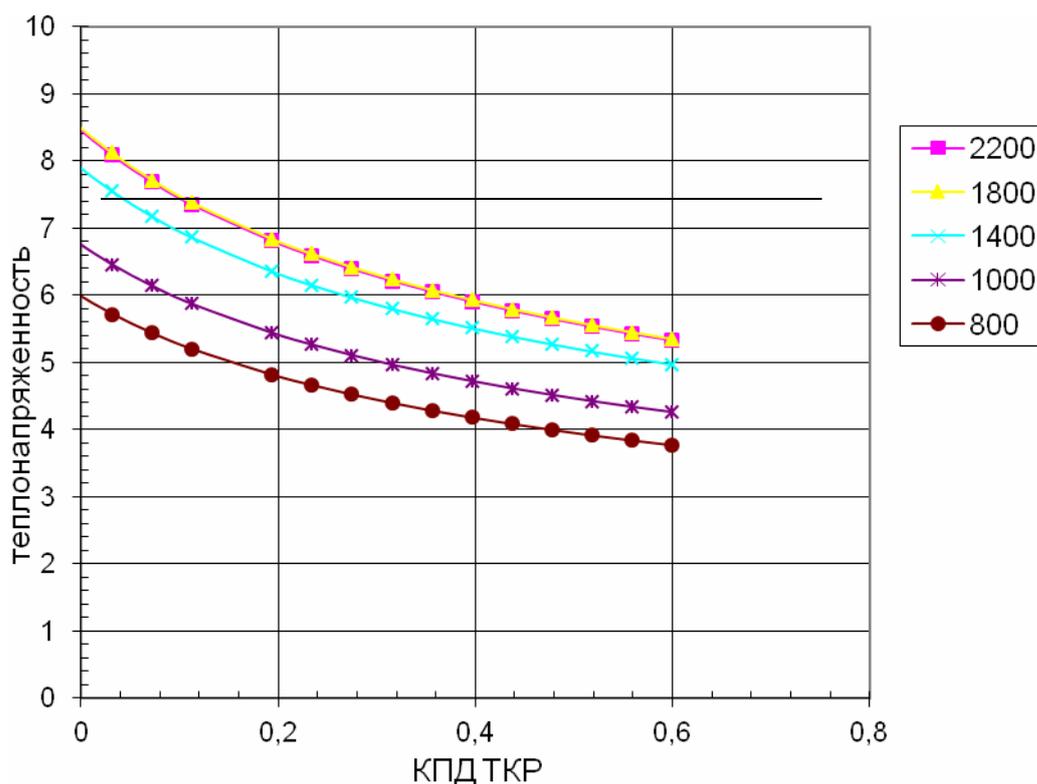


Рис. 2.5. Зависимость показателей теплонапряженности двигателя Д-245-35 от частоты вращения двигателя и КПД турбокомпрессора

2.6. Обоснование метода выбора диагностируемых параметров правильного функционирования турбокомпрессора в эксплуатации

Изложенное выше позволяет констатировать, что в процессе функционирования мобильного сельскохозяйственного агрегата имеется возможность отслеживать информацию о работоспособности ТКР, контролируя его выходные показатели. Учитывая, что на диагностику отводится определенное время, то из экономических соображений целесообразно за этот промежуток времени проверять такие показатели работы ТКР, которые обеспечат наибольшую достоверность результатов контроля его работоспособности. Предлагаемая методика и выбор диагностических параметров основана на их информативности с учетом их взаимосвязи с функциональными показателями двигателя и экономичностью диагностирования [166].

Исходя из того, что турбокомпрессор как объект диагностирования в системе воздухоподдачи дизеля характеризуется различными диагностируемыми параметрами a_1, a_2, a_j , и которые в общем случае могут представлены эксплуатационными показателями (давлением наддува, давлением перед компрессором, давлением до и после турбины, частотой вращения

ротора ТКР, температурами газа в компрессоре и турбине, КПД ТКР, шумностью, вибрацией и другими). Наличие каждого из показателей на выходе объекта зависит от работоспособности определенных групп элементов ТКР. Допустим, что элементы, необходимые для наличия какого-либо диагностируемого параметра a_j , составляет подмножество A_j из множества A . Принимаем, что достоверность диагностирования всех параметров одинакова и время на контроль каждого равно t .

Ценность диагностируемого параметра определяется тем, какой объем информации он несет. При выборе диагностируемых параметров важно установить степень связи их с техническим состоянием объекта [100]. При этом вероятность исправного состояния ТКР до и после диагностики a_j -го параметра будет различной. Если принять вероятность исправного (работоспособного) состояния ТКР до диагностики $P(S)$ (априорная вероятность), а после диагностики a_j -го параметра (апостериорная вероятность) стала $P_{aj}(S)$. Тогда разность между апостериорной и априорной вероятностями работоспособного состояния покажет насколько возросли наши знания о техническом состоянии проверяемого объекта. Если знания о техническом состоянии объекта не изменились, или изменились незначительно, то выбранный диагностируемый параметр малоценен. Следовательно, чем больше разность $\Delta P_c = P_{aj}(S) - P(S)$, тем более ценен для диагностики параметр [17].

В связи с тем, что время диагностирования при техническом сервисе ограничено, то оно должно быть обязательно учтено. Тогда в единицу времени:

$$\varphi_j = \frac{P_{aj}(S) - P(S)}{t}, \quad (2.48)$$

где φ_j – ведущая функция процесса; t – время, затрачиваемое на диагностику выбранного параметра.

Из зависимости (2.48) видно, что для выбора диагностируемого параметра важны как приращения апостериорной вероятности работоспособного состояния, так и время, затрачиваемое на диагностику выбранного параметра.

Апостериорная вероятность работоспособного состояния объекта $P_{aj}(S)$ может быть определена по формуле Байеса [9]:

$$P_{aj}(S) = \frac{P(S) \cdot P\left(\frac{S}{a_j}\right)}{R_{aj}}, \quad (2.49)$$

где $P(S/a_j)$ – вероятность работоспособного состояния объекта при условии, что выбраны для диагностики именно этот параметр a_j ; R_{aj} – полная вероятность события, заключающаяся в том, что выбранный параметр a_j

действительно годен для диагностики с вероятностью $(1 - \alpha)$ и негоден с вероятностью β .

Подставляя (2.48) в (2.49) получим:

$$\varphi_j = \frac{P(S)}{t} \cdot \left(\frac{P\left(\frac{S}{a_j}\right)}{R_{aj}} - 1 \right), \quad (2.50)$$

Из формулы (2.50) следует, что ведущая функция процесса φ_j будет иметь максимум при:

$$\frac{P\left(\frac{S}{a_j}\right)}{Ra_j} = \max.$$

Таким образом, выбор диагностируемых параметров сводится к следующему. Для всех возможных параметров подсчитывают $P\left(\frac{S}{a_j}\right) / Ra_j$ и ведущую функцию процесса φ_j . Затем выбирают параметр, имеющий максимальное значение φ_j .

Следующий параметр выбирают по аналогичному максимальному φ_k/a_j , но с учетом того, что первый параметр выбран наилучшим образом.

Для второго параметра ведущая функция процесса будет иметь вид:

$$\varphi_{k/aj} = \frac{P_{aj} \cdot a_k(S) - P_a(S)}{t} = \frac{P_a(S)}{t} \left(\frac{P\left(\frac{S}{K}\right)}{R_{ak}} - 1 \right).$$

Для последующих параметров определение ведущей функции процесса аналогично. Выбор параметров может продолжаться до тех пор, пока не будет достигнуто ограничение по времени, сложности или требуемой вероятности безотказной работы турбокомпрессора.

При комплексной диагностике, когда одновременно проверяется несколько диагностируемых параметров, ведущая функция процесса определяется соотношением:

$$\varphi_{\sum aj} = \frac{P(S) - \left(\frac{P\left(\frac{S}{a_j}\right) - 1}{R_{aj}} \right) + P_{aj} a_k(S) \cdot \left(\frac{P\left(\frac{S}{K}\right) - 1}{R_{ak}} \right) + P_{aj} a_k \dots a_n(S) \left(\frac{P\left(\frac{S}{n}\right) - 1}{R_{an}} \right)}{t}. \quad (2.51)$$

При этом допускается, что на диагностирование каждого параметра в случае их последовательного выявления затрачивается одинаковое время t .

Как видно из уравнения (2.51) ведущая функция процесса будет в n раз больше той, которая получается при последовательной диагностике параметров. В указанных выше зависимостях вместо времени t можно подставлять стоимость диагностики a_j -го параметра. Тогда выбор диагностируемых параметров будет зависеть от экономических ограничений. Данные теоретические предпосылки могут быть положены в основу разработки для различных видов диагностики комплекса диагностических параметров и соответствующего оборудования. Предпочтение следует отдавать тем приборам и приспособлениям, которые обеспечивают достаточную точность и сравнительно малое время или стоимость на процесс диагностирования того или иного параметра.

Ведущую функцию процесса диагностирования ТКР в общем виде представим зависимостью:

$$\varphi_j = \frac{\Pi_{\Sigma} - \Pi_j}{t}, \quad (2.52)$$

где Π_{Σ} – показатель работоспособного состояния ТКР (КПД турбокомпрессора, обороты ротора и др.), принимаем их известными и равными номинальным значениям; Π_j – показатель работоспособного состояния ТКР после диагностики (фактически замеренные показатели).

Зависимость (2.52) представим применительно для следующих параметров:

– оборотов турбокомпрессора

$$\varphi_{jn_k} = \frac{n_{tkn} - n_{tk\phi}}{t}; \quad (2.53)$$

– КПД турбокомпрессора

$$\varphi_{jn_k} = \frac{\eta_{tkn} - \eta_{tk\phi}}{t}, \quad (2.54)$$

где n_{tkn} , η_{tkn} – номинальные значения оборотов и КПД ТКР технически исправного турбокомпрессора; $n_{tk\phi}$, $\eta_{tk\phi}$ – фактические значения частоты вращения и КПД ТКР определенные в момент диагностирования; t – время на диагностирование, мин.

Для того, чтобы обеспечить максимум функции φ_{jn_k} , φ_{jn_k} необходимо, чтобы разность в числителе зависимости (2.53) и (2.54) была наибольшей.

С этой целью необходимо установить предельное уменьшение значения $n_{tk\phi}$, $\eta_{tk\phi}$ в эксплуатации. В зависимости от поставленных целей,

предельное снижение показателей ТКР может быть назначено по различным ограничениям:

- по допустимым ограничениям снижения эффективной мощности, ΔN_e ;
- по допустимым ограничениям увеличения удельного эффективного расхода топлива, Δg_e ;
- по допустимым ограничениям роста теплонапряженности двигателя q_p . Ранее проведенный расчет позволил установить $n_{tk_пред} = 85000$ об/мин, $\eta_{tk_пред} = 0,28$.

Следовательно, диагностируемые параметры ТКР n_{tk} , η_{tk} могут быть выбраны в качестве диагностируемых по степени влияния на такие выходные показатели двигателя, как мощность, удельный расход топлива, теплонапряженность и другие.

2.7. Развитие методов оценки технического состояния турбокомпрессора по параметрам его функционирования

Параметры ТКР (давление наддува, расход воздуха, частота вращения вала, КПД), а также выходные параметры двигателя, зависящие от параметров ТКР (мощность, удельный расход топлива, дымность, температура отработавших газов, теплонапряжённость и др.) являются носителями информации о степени работоспособности турбокомпрессора.

Оценка состояния ТКР по уровню параметров воздухоподачи, температуре отработавших газов, теплонапряжённости является, в настоящее время, одним из новых методов определения его исправности в процессе эксплуатации.

Эффективность оценки состояния ТКР по уровню параметров воздухоподачи и теплонапряжённости определяется:

- уровнем точности контрольно-измерительной аппаратуры, используемой для измерения этих параметров;
- достоверностью технических норм на допускаемые отклонения давления наддува, температуры отработавших газов, теплонапряженности двигателя.

Однако данные оценки применимы чаще для установления предельных значений параметров, по достижению которых объект подлежит капитальному ремонту. Для целей эксплуатации более приемлемы оценки технического состояния ТКР по уровню параметров, характеризующих правильность его функционирования в составе двигателя мобильного сельскохозяйственного агрегата. К таким оценкам могут быть отнесены допускаемые отклонения частот вращения ТКР и его КПД во всем диапазоне скоростной (регуляторной) характеристике двигателя. На ниже приведенных графиках указаны границы эффективной работы турбокомпрессора в составе двига-

теля мобильного сельскохозяйственного агрегата, построенные с учетом расчетных данных. Зона 1 на графиках (рис. 2.5) и (рис. 2.6) характеризует правильное функционирование агрегата наддува, нижняя граница обусловлена допустимым снижением эффективной мощности двигателя с наддувом в 11 % [142]. Зона 2 указывает на работу двигателя в режиме пониженной эффективности, причем эксплуатация проходит с повышением тепловой нагрузки. При падении значений частоты вращения вала турбокомпрессора и его КПД до границы зоны 2, указывает на необходимость комплексного обследования турбокомпрессора на ближайшем ТО. Зона 3 характеризует состояние при котором дальнейшая эксплуатация может привести к серьёзным повреждениям двигателя, по причине повышенной теплонапряженности.

Задачу диагностики состояния ТКР можно решать на одном из двух уровней.

На первом уровне принятие решений о состоянии объекта может производиться двумя подходами.

Методы оценки технического состояния ТКР на сравнении фактических или расчётных значений параметров двигателя с техническими нормами на допускаемые отклонения этих параметров или на сравнении темпов изменения параметров по мере выработки ресурса.

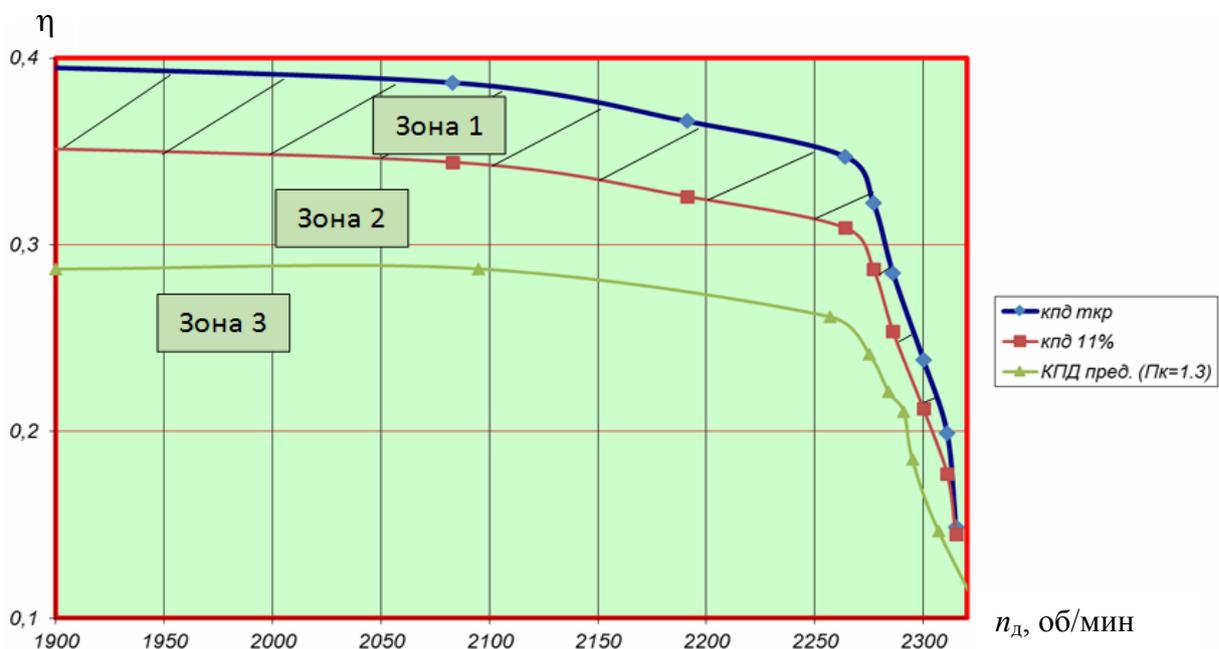


Рис. 2.5. Изменение КПД турбокомпрессора от оборотов двигателя

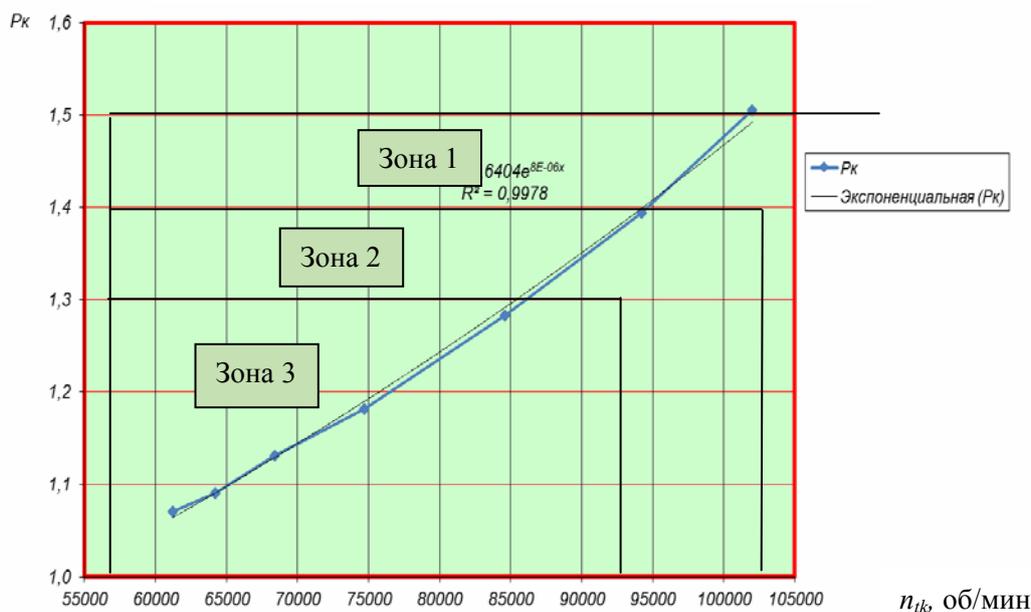


Рис. 2.6. Зональное распределение эффективности работы системы наддува:
 зона 1 – эффективная работа двигателя;
 зона 2 – неэффективная работа двигателя;
 зона 3 – предельная теплонапряженность деталей двигателя и ТКР

Обычно производят оценку состояния в данный момент времен и без использования априорной информации о предыстории состояния и, следовательно, без каких-либо дальнейших его прогнозов. Такой подход фактически совпадает с процедурой контроля состояния и относится к диагностическим методам допускового контроля, т.е. если значения параметров находятся в пределах технических норм, считается, что состояние объекта относится к категории годных, а если значения параметров находятся за пределами технических норм, то к категории дефектных. Такой подход, к оценке состояния при наличии достоверных технических норм получил широкое распространение в эксплуатации. Этот способ предполагает наличие взаимосвязи между технической нормой и состоянием двигателя на различных режимах работы [103, 104, 143, 155, 156].

Использование такого подхода для оценки состояния является достаточно простым при наличии априорного решения вопросов, связанных с обоснованием выбора конечного числа диагностических параметров и с разработкой методов расчёта технических норм. Поэтому отождествление технических норм X_T с диагностическим допуском X_d , т.е. принятие $X_T = X_d$ неблагоприятно сказывается на правильности получаемого ответа при оценке состояния и предполагает появление в диагностическом процессе таких ситуаций, когда часть годных изделий будет признаваться дефектными, а часть дефектных – годными. Это обстоятельство порождает необ-

ходимость решения дополнительных вопросов по определению оптимальных допусков на выходные параметры.

Второй подход основан на оценке характера и динамики изменения параметров. При его использовании требуется дискретное или непрерывное измерение параметров по времени. Признаком изменения состояния в данном случае является момент времени t , который соответствует началу изменения параметров отличного от типового протекания. Начало изменения состояния в данном случае определяется моментом времени t и скоростью изменения параметров. Информативность такого метода оценки состояния может быть повышена при использовании одновременно нескольких параметров, взаимосвязанных между собой в соответствии с моделью двигателя.

Оценку момента начала нештатного изменения параметров можно производить различными методами:

- методом определения момента начала изменения параметров, основанного на анализе тренда параметров, путём сравнения значений результатов измерения на различных участках измерения;

- методом спектрального анализа, основанным на выделении из сигнала вторичных признаков, путём перевода исследований из временной области в частотную область. Применение спектрального анализа, во многих случаях, позволяет получить эффективное распознавание состояния дизельного двигателя с газотурбинным наддувом, что объясняется наличием в двигателе неисправностей, проявляющихся в росте амплитуд отдельных периодических составляющих в спектральном составе сигналов, поступающих от датчиков контролируемых параметров. Однако сложный и длительный анализ спектров, большой объём необходимой априорной информации не всегда позволяют получать, на базе спектрального метода, конструктивные алгоритмы распознавания состояний двигателя в масштабе реального времени;

- методом определения нештатного изменения параметров, основанного на моделировании дискретных измерений параметров в процессе наработки моделями авторегрессии. Модели авторегрессии достаточно эффективно используются для анализа временных рядов, которыми можно математически описывать реализации дискретных измерений параметров двигателя по времени наработки. Модель авторегрессии представляет собой запись колебательного процесса на входной широкополосный процесс, типа белого шума, что соответствует природе дискретных измерений параметров двигателя, состоящих из действительного значения измеряемой величины и случайной ошибки измерения в виде белого шума. Момент изменения свойств реализаций результатов измерений, при использовании моделей авторегрессии, определяется из условия обеспечения максимума функции правдоподобия.

На втором уровне оценка состояния сводится не только к распознаванию годного и негодного двигателя, но и к определению места локализации дефекта, выявлению внутренних причин появления признаков дефектного состояния. В этом случае по информации, которую несут параметры воздухоподачи, теплонапряжённости с помощью детерминированных или вероятностных моделей объекта диагностики определяются причины дефектного состояния ТКР.

Для формирования методов диагностики в любом случае требуется решение вопросов, связанных с построением моделей объекта диагностики и с выбором наиболее информативных параметров, характеризующих техническое состояние правильного функционирования турбокомпрессора.

Таким образом, проведенные в разд. 2 теоретические исследования позволяют сформировать следующее:

1. Для изучения взаимосвязей показателей работы двигателя и турбокомпрессора разработана математическая модель в виде аналитических зависимостей давления наддува, давления перед турбиной, КПД турбокомпрессора и критерия теплонапряженности двигателя.

2. Обосновано соотношение частот вращения $\frac{n_{тэ}}{n_t}$ (по регуляторной характеристике), которое может быть принято в качестве оценочного диагностического показателя технического состояния правильного функционирования турбокомпрессора ($\frac{n_{тэ}}{n_t} = 0,95 \div 1,05$ соответствует исправному

состоянию; при $\frac{n_{тэ}}{n_t} = 0,85 \div 0,95$ снижены показатели эффективности; при

$\frac{n_{тэ}}{n_t} < 0,85$ дальнейшая эксплуатация может привести к тяжелым неисправностям).

3. Установлено, что КПД турбокомпрессора η_{tk} (его составляющие η_k , η_t , η_{tkm}) характеризуют не только степень согласования его характеристик с характеристиками двигателя, но и общее техническое состояние турбокомпрессора в эксплуатации. Факторами снижения η_{tk} в эксплуатации могут быть:

- гидравлические утечки в линии нагнетания;
- гидравлические утечки в турбине;
- увеличение сопротивления вращению вала ТКР;
- неисправность в системе управления турбокомпрессором.

4. Наибольшим изменениям в сторону снижения подвержен механический КПД η_{tkm} турбокомпрессора по причине увеличения сил трения в

подшипниковом узле и возрастания сопротивления вращению турбинного и компрессорного колес по мере наработки.

5. Предложена методика оценки правильности функционирования ТКР в эксплуатации по его разгонным характеристикам с помощью нового технического средства (патент на полезную модель РФ №145761 от 24.12.2013 г.). Для ТКР 6.1 получили значения времени разгона $t_1=3,5$ с, при амплитудном значении $\omega = 105000$ об/мин для исправного состояния при $\eta_{ik} = 0,4$. Установлено, что снижение $\eta_{ik} = 0,3$ приводит к возрастанию времени разгона до 5,5 с, при этом амплитудное значение частоты вращения вала ТКР не превышает 86000 об/мин.

6. Разработана методика расчета предельных по теплонапряженности двигателя значений КПД турбокомпрессора. На программное обеспечение получен охранный документ РФ «Программа определения технического состояния турбокомпрессора» (свидетельство №2014616619).

7. Предложена методика обоснования и выбора в качестве диагностических параметра, характеризующих правильность функционирования ТКР по частоте вращения ротора ТКР и его КПД. Определено условие максимальной информативности оборотов вала ТКР и КПД турбокомпрессора в качестве диагностических показателей.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Экспериментальное оборудование

Целью проведения исследований явилось проверка результатов теоретических исследований, практическое изучение закономерностей процессов, определяющих правильность функционирования агрегатов системы газотурбинного наддува, установление факторов, наиболее существенно влияющих на работу турбокомпрессора.

В качестве объекта исследования был выбран турбокомпрессор ТКР 6.1 установленный на тракторный двигатель Д-245-35 с ТКР 6.1. Испытания двигателя проводили в соответствии с ГОСТ 18509-88 «Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний» (последняя редакция 18.05.11 г.). При испытаниях снималась регуляторная характеристика двигателя и параметры, необходимые для определения КПД турбокомпрессора.

Испытания проводились на лабораторной установке с использованием обкаточно-тормозного стенда КИ-5543 ГОСНИТИ (рис. 3.1) [51, 53, 55, 58].



Рис. 3.1. Обкаточно-тормозной стенд КИ-5543 ГОСНИТИ

Испытания проводились по общим и частным методикам, отраженным в работах [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 108, 119, 141].

Для повышения точности и скорости обработки информации в процессе испытаний применялось как стандартное [48, 98, 163], так и спе-

циально разработанное оборудование. В частности, были разработаны дополнительные аппаратные и программные средства, позволяющие производить необходимые расчеты и вести накопление статистической информации [57, 59, 61, 63].

В процессе экспериментов контролировались следующие параметры: давление наддува, давление выпускных газов перед и после турбины, давление воздуха после системы очистки воздуха, температура всасываемого воздуха, температура надувочного воздуха, температура отработавших газов перед и после турбины, частота вращения ротора ТКР по ниже приведенной схеме (рис. 3.2) [52].

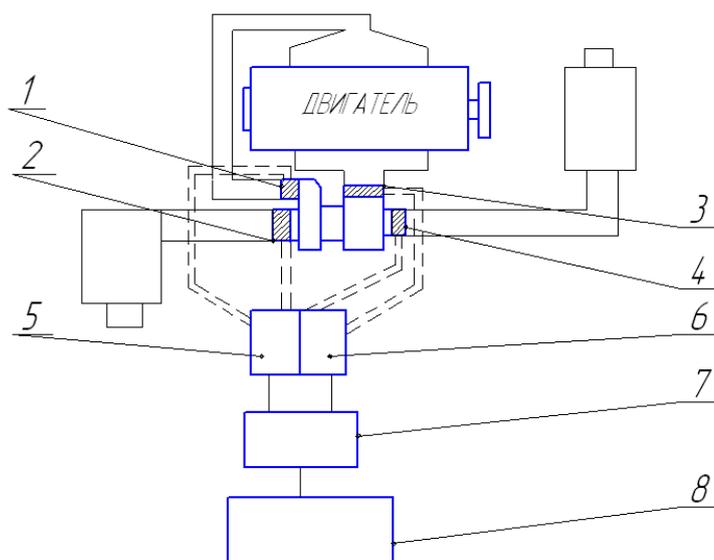


Рис. 3.2. Схема измерения показателей ТКР и двигателя при экспериментах:
 1 – проставка «ТКР – впускной коллектор»;
 2 – проставка «воздухоочиститель – ТКР»; 3 – проставка «выпускной коллектор – ТКР»; 4 – проставка «ТКР – система выпуска»; 5 – модуль измерения давлений; 6 – модуль измерения температур; 7 – вычислительный блок; 8 – блок отображения результатов

Схема реализации способа измерений параметров содержит проставки 1-4 для подключения датчиков давлений и температур, модуль для измерения давлений 5, состоящий из 4-х независимых ресиверов (рис. 3.3) необходимых для сглаживания пульсаций давлений газов при работе двигателя внутреннего сгорания, модуль для измерения температур 6, вычислительный блок 7, блок отображения результатов 8.

В методике предусматривалось измерение как прямых входных параметров системы наддува (давление воздуха на входе в компрессор, температура воздуха на входе в компрессор, температура отработавших газов перед турбиной, давление отработавших газов перед турбиной), так и выходных параметров системы воздухоподачи (давления надувочного воздуха, температура надувочного воздуха, давление отработавших газов после турбины, температура отработавших газов после турбины).

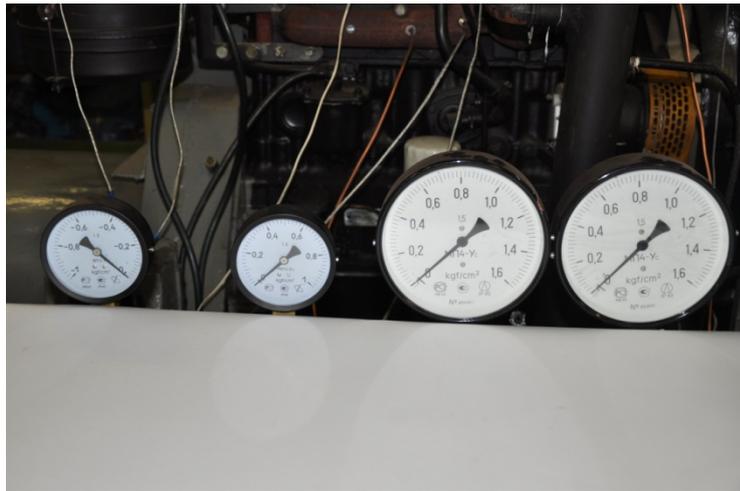


Рис. 3.3. Батарея независимых ресиверов

Измерение осуществлялось следующим образом: для исключения возможности задержки вывода результатов на ПК из-за специфики работы АЦП и ПК система предусматривала двойной контроль снимаемых параметров. В первом случае при помощи автоматической фиксации снимались показания с аналоговых приборов, во втором с аналоговых датчиков через АЦП показания записывались на ПК, затем временные шкалы совмещались и обрабатывались в программе для ЭВМ «Программа определения технического состояния турбокомпрессора» (свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ № 2014616619 от 30.06.2014 г.) [148].

Аналоговые сигналы имеют преимущества по сравнению с цифровыми сигналами, потому что скорость изменения сигнала не зависит от применяемого оборудования, тогда как для быстрых цифровых сигналов требуется мощный процессор обработки, что увеличивает стоимость системы, требует решения проблемы наложения на сигнал высокочастотной



Рис. 3.4. Датчик давления наддува 47.3829

составляющей (требуется экранирование сигналов и применение дополнительных фильтров). Оптимальными будут аналоговые датчики, позволяющие контролировать параметры с требуемой точностью, и общая плата сбора данных, преобразующая выходные напряжения с датчиков в цифровые сигналы.

Для контроля параметров давления наддува и давления выпускных газов выбран датчик давления наддува воздуха (47.3829), выпускаемого ОАО «Автоматическая электроника». ТУ37. 473. 003–99 (рис. 3.4). Датчик параметрический, имеет

встроенный усилитель, питание +5 В. потребляемый ток 6-10 мА. Для питания используем блок питания ROBITON с регулятором напряжения.

Датчик имеет линейную характеристику по напряжению с пределом от 0,5 до 4,5 В. Диапазон абсолютного давления от 100 до 240 кПа.

Для контроля разрежения воздуха (абсолютное значение давления воздуха) использовался датчик абсолютного давления 45.3829, выпускаемый ОАО «Автоэлектроника» (рис. 3.5). Датчик имеет линейную зависимость по напряжению с пределом от 0,75 В до 4,75 В. Предел измерений давлений от 50 до 250 кПа (абсолютное давление).



Рис. 3.5. Датчик абсолютного давления 45.3829

Преобразование аналоговых сигналов осуществлялось посредством платы L-783 разрядностью 12 бит. производства ЗАО «Л-Кард» установленной в персональной ЭВМ типа IBM PC/AT. Плата имеет 32 входных канала обработки сигналов с максимальной частотой преобразования 3 МГц (рис. 3.6, 3.7). АЦП позволяет производить оцифровку аналогового сигнала при одноканальном режиме с частотой до 3 МГц [62, 64]. При увеличении числа опрашиваемых каналов, максимальная частота опроса делится на количество каналов. Кроме того, частотой можно управлять программно и установить необходимое значение исходя из методики проведения эксперимента.



Рис. 3.6. Плата сбора данных L 783 фирмы ЗАО «Л КАРД»

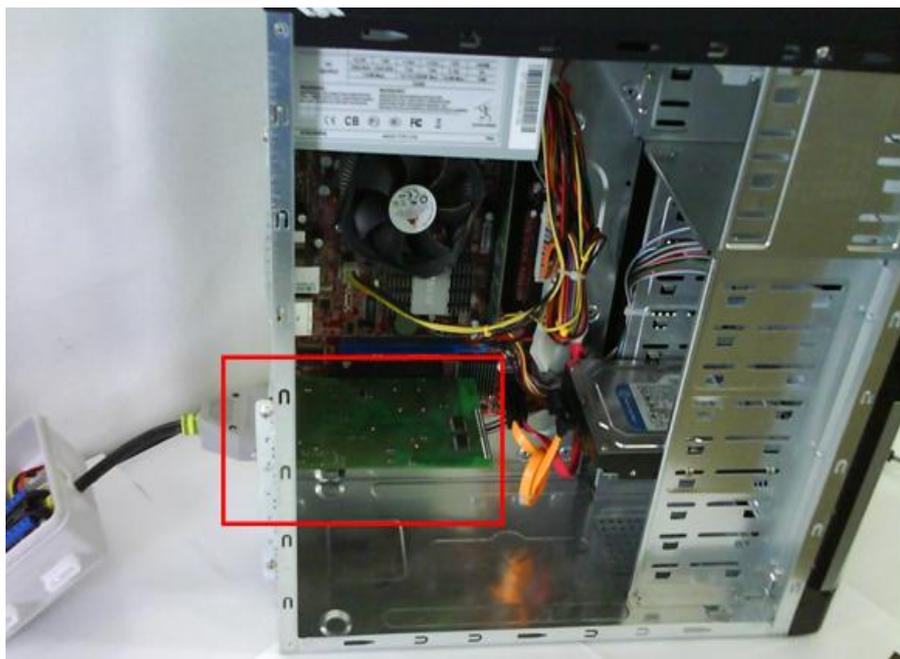


Рис. 3.7. Установка платы сбора данных L 783 фирмы ЗАО «Л КАРД» в шину PCI 2.3 материнской платы компьютера



Рис. 3.8. Консоль приборов

Для измерения температуры воздуха и температуры отработавших газов использовалась система, разработанная компанией Zet Lab (рис 3.9) [52].



Рис. 3.9. ZET 7020 ТермоТС-CAN интеллектуальный термодатчик термопары с интерфейсом CAN

Интеллектуальный датчик температуры состоит из термопары и модуля ZET 7020 ТермоТС-CAN, который осуществляет преобразование сигнала с датчика в значения температуры. Полученные значения температуры передаются по протоколу Modbus по интерфейсу CAN. Использование интеллектуальных датчиков не требует настройки измерительных каналов. Интеллектуальный термопреобразователь сопротивления ZET 7020 ТермоТС-CAN внесен в реестр средств измерений под № 52802-13. Технические характеристики модуля ZET 7020 отображены в табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3.1

Характеристика измерительного модуля

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Измеряемый параметр		температура
Частота выдачи данных	Гц	1, 4
Интерфейс передачи данных		CAN 2.0
Типы подключаемых термопар		R, S, B, J, T, E, K, N, A1, A2, A3, L, M
Класс точности		0.5
Питание устройства	В	от 9 до 24
Потребляемый ток при напряжении 12 В	мА	до 40
Габаритные размеры	мм	65x34x14
Масса	г	35

Внешний вид модуля ZET 7120 изображен на (рис. 3.10, 3.11). На базе интеллектуальных датчиков построили распределенную измерительную сеть. Для подключения измерительной сети к системам ZETLAB и ZETVIEW используем преобразователь интерфейса ZET 7174.



Рис. 3.10. Модуль ZET 7020 для измерения температуры с помощью термопар, вид со стороны подключения датчика температуры



Рис. 3.11. Модуль ZET 7020 для измерения температуры с помощью термопар, вид со стороны подключения к измерительной сети

Программное обеспечение ZETLAB поддерживает подключение до 200 датчиков к одному компьютеру. Измерительные сети также могут подключаться к любой системе, использующей протокол Modbus по интерфейсу CAN. Окно отображения результатов показано на рис. 3.12.

В качестве первичных преобразователей для измерения температуры использовались хромель-алюмелевые термопары, являющиеся термоэлектрическим преобразователем (рис. 3.13).

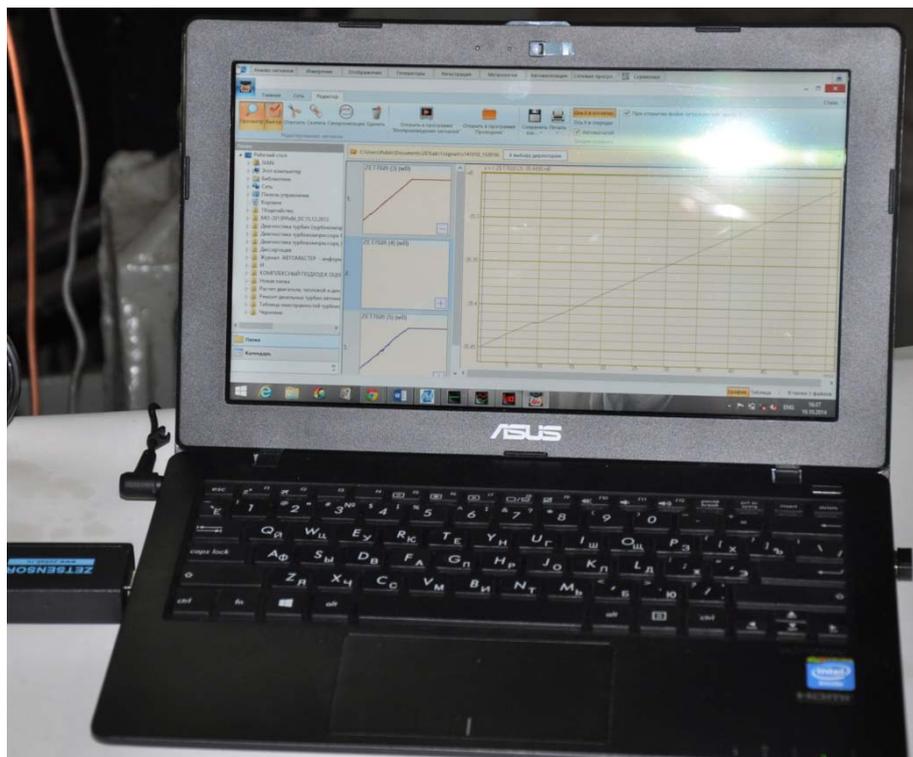


Рис. 3.12. Окно отображения результатов измерений в ZETLAB



Рис. 3.13. Датчик температуры (термопара ТХА.ГПКШ.013-03)

Термоэлектрические преобразователи являются наиболее распространенными средствами измерения температуры [139].

Термоэлектрический метод измерения температуры основан на зависимости термоэлектродвижущей силы (термо ЭДС), развиваемой термопарой от температуры ее рабочего конца.

Термо ЭДС возникает в цепи, составленной из двух разнородных проводников (электродов), если значения температуры мест соединения t и t_0 не равны (при равенстве температур термо ЭДС равна нулю). Возникающая в цепи термопары ЭДС является результатом действия эффектов Зеебека и Томпсона. Первый связан с появлением ЭДС в месте спая двух разнородных проводников, причем величина ЭДС зависит от температуры спая. Эффект Томпсона связан с возникновением ЭДС в однородном проводнике при наличии разности температур на его концах.

Термопары типа ТХА имеют линейную характеристику практически на всем диапазоне работы. Диапазон измерения варьируется от -40 до 800 градусов Цельсия [48, 139].

Монтаж устройств и термопар осуществлялся следующим образом. На рис. 3.14 изображена установка термопары и устройства измерения давления отработавших газов.

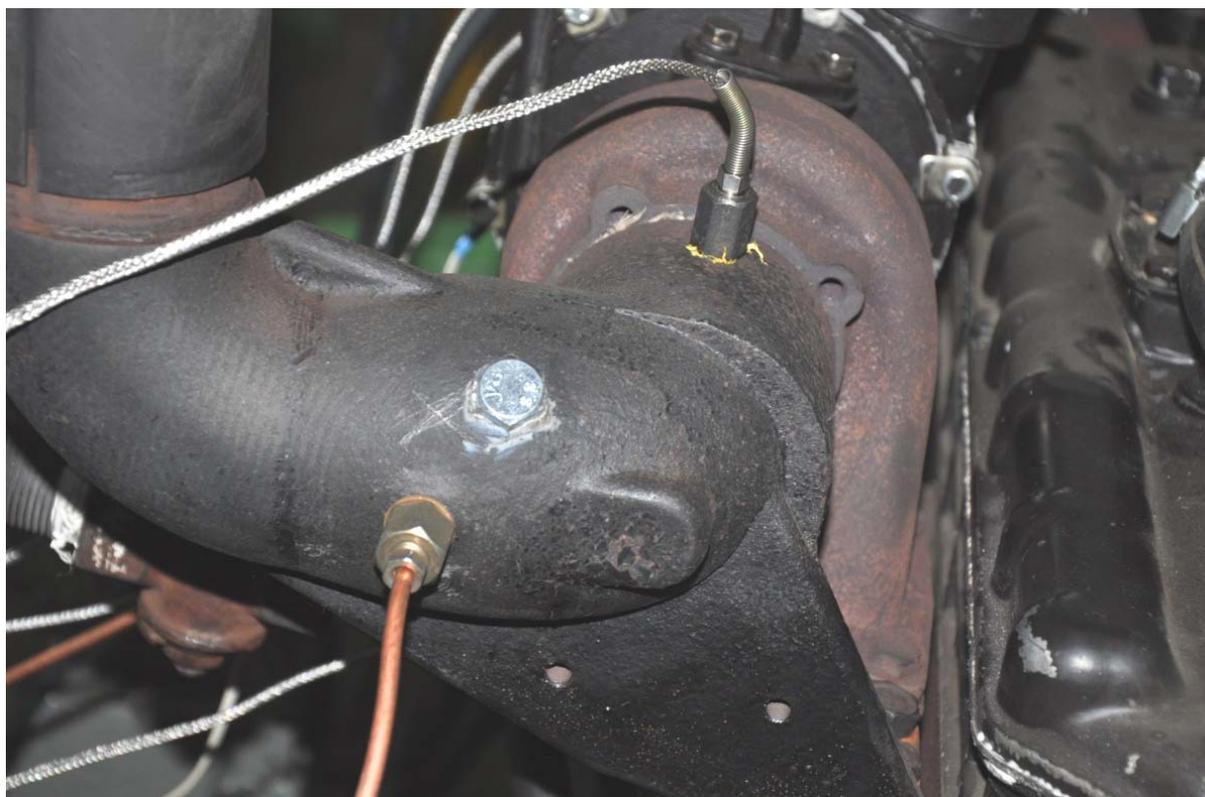


Рис. 3.14. Монтаж устройства измерения давления отработавших газов и термопары на выпускной коллектор

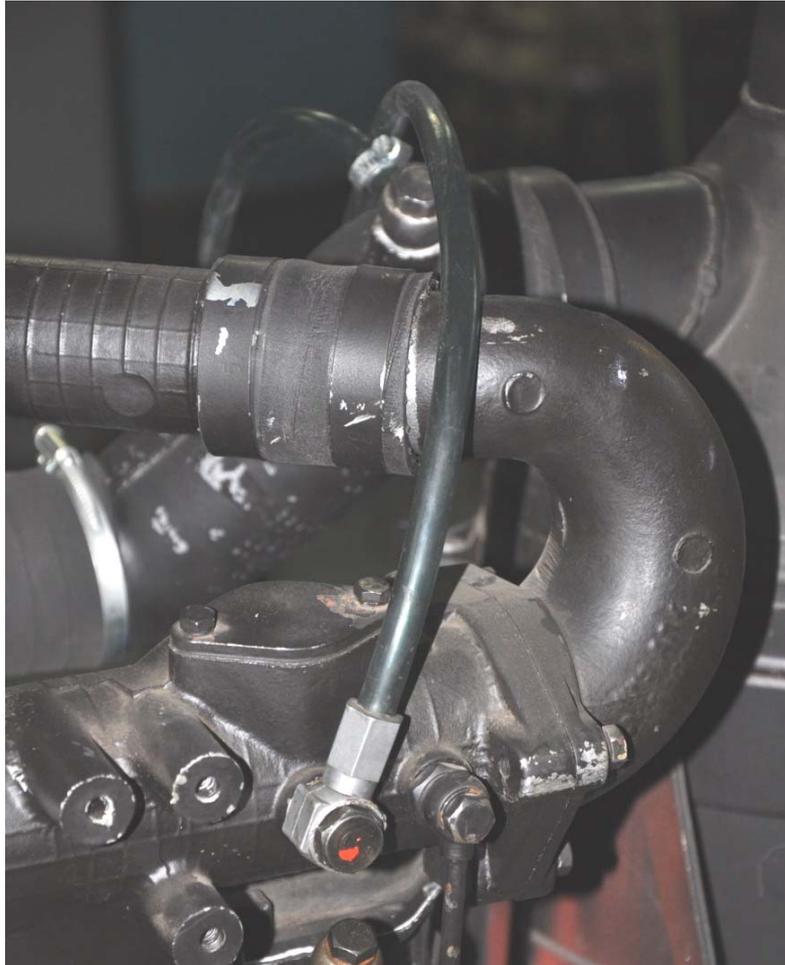


Рис. 3.15. Монтаж устройства измерения давления наддува на впускном коллекторе двигателя Д245-35 вместо штатной заглушки

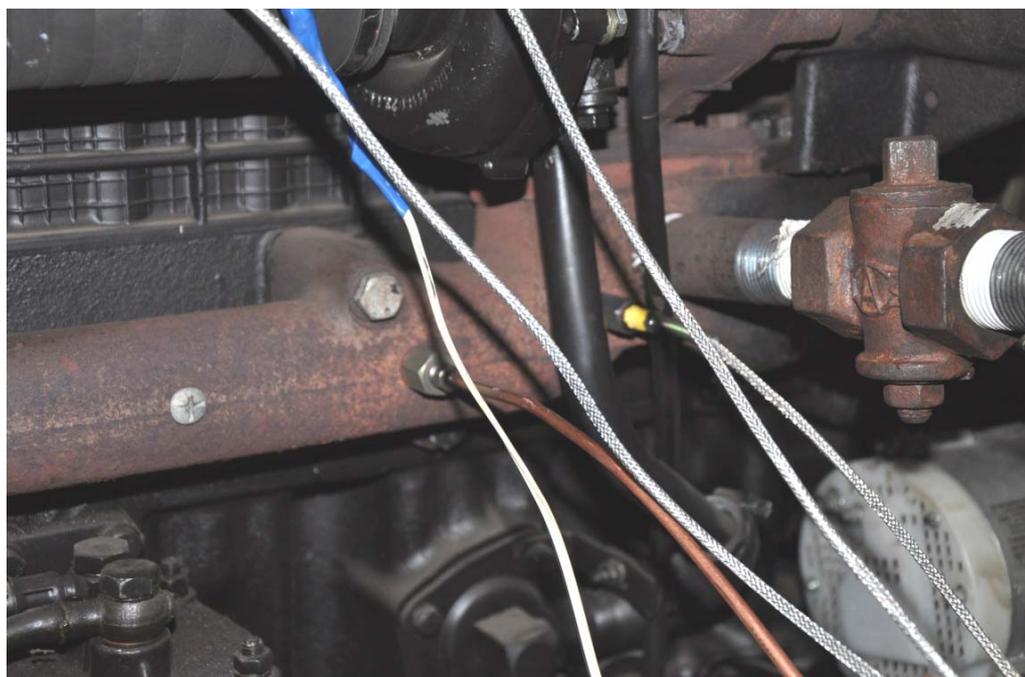


Рис. 3.16. Монтаж устройства измерения давления отработавших газов перед турбиной и термопары на выпускной коллектор двигателя Д 245-35



Рис. 3.17. Моновакуумметр ВПЗ-Ус

Для контроля разрежение воздуха (абсолютное значение давления воздуха) использовалось разработанное устройство для измерения абсолютного давления воздуха с установленным моновакуумметром ВПЗ-Ус 0-1 Атм.

Для контроля частоты вращения применялся датчик собственной конструкции (рис. 3.18) патент РФ на полезную модель № 145761 от 24.12.2013 г. [133]. Устройство работает следующим образом. При вращении компрессорного колеса турбокомпрессора закреплённая на нем пластина

позволяет формировать входной сигнал синусоидальной формы. Пластина сбалансирована и не вносит дисбаланс в конструкцию турбокомпрессора. Кроме того, она имеет малую лобовую площадь, не препятствуя и не изменяя структуру воздушного потока. Магнитно-индукционный датчик воспринимает входной сигнал с пластины и формирует эквивалентный ему в информационном смысле измерительный сигнал, поступающий по экранированным кабелям в измерительный блок, где параметры измерительного сигнала, в частности частота, регистрируются и отображаются на дисплее.



Рис. 3.18. Устройство измерения частоты вращения вала ТКР

В связи с множеством явлений, порождающих снижение частоты вращения, для локализации неисправности методами безразборной диагностики потребовалось применение комплекса оборудования, позволяющего оценить техническое состояние правильного функционирования турбокомпрессора, путем анализа эффективности работы его узлов (рис. 3.19).

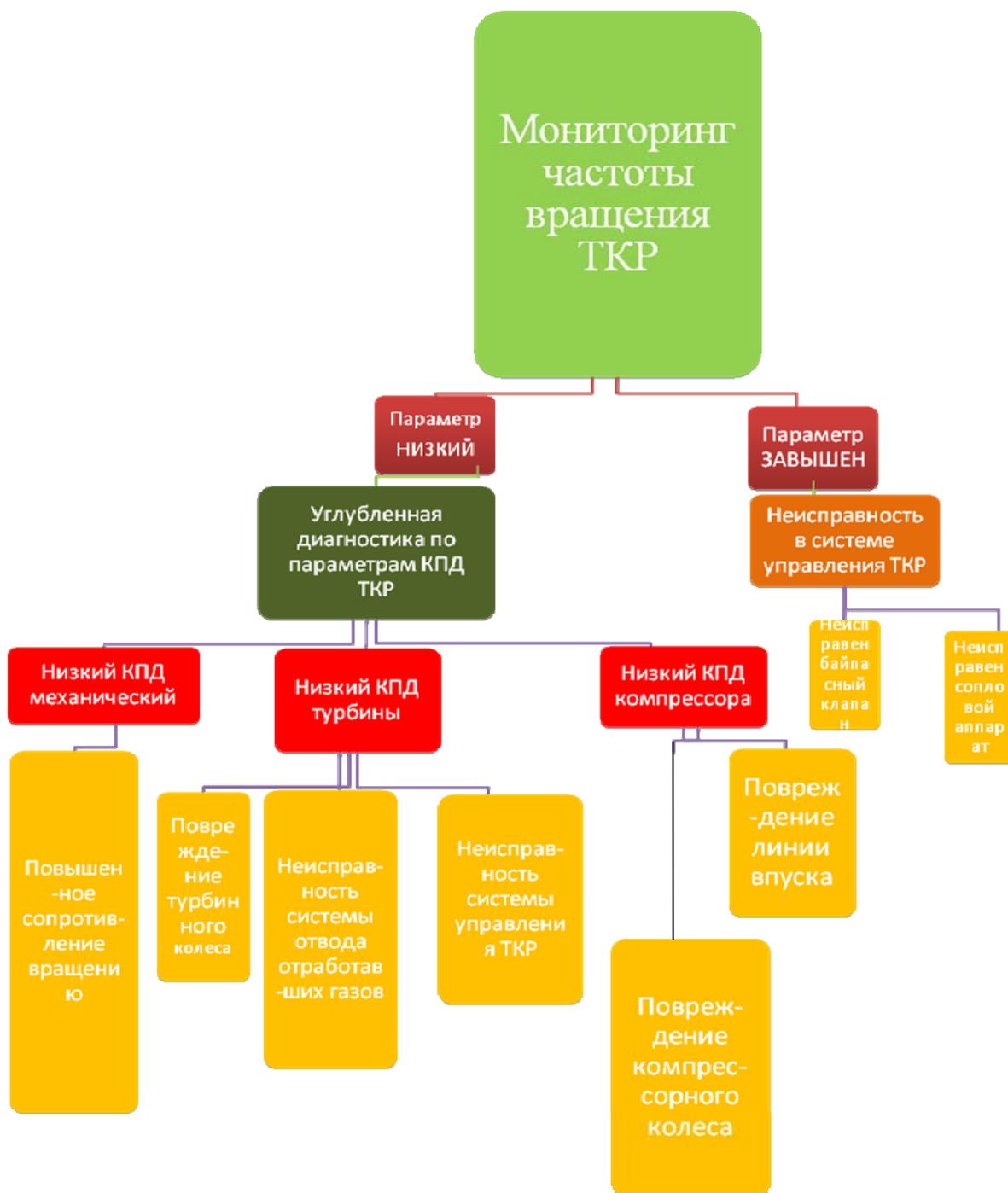


Рис. 3.19. Схема мониторинга правильного функционирования турбокомпрессора

Общий вид измерительной системы по изучению показателей работы системы наддува представлен на (рис. 3.20).



Рис. 3.20. Измерительная система по изучению показателей работы системы наддува, установленная на двигателе Д-245-35 и ТКР-6.1 с использованием обкаточно-тормозного стенда КИ 5543 ГОСНИТИ

Разработанные нами методика и соответствующая измерительная система по изучению показателей работы системы наддува с целью контроля эффективности его функционирования представляет совокупность диагностических средств. К аппаратным средствам относят первичные преобразователи физических величин, встроенные усилители аналоговых сигналов, аналогово-цифровые преобразователи. Программные средства представлены в виде программы для ЭВМ. Программа выполняет задачи как самостоятельно, так и в качестве модуля измерительной системы по изучению показателей работы системы наддува, установленной на двигателе Д-245-35 и ТКР-6.1 с использованием обкаточно-тормозного стенда КИ 5543 ГОСНИТИ.

Для оценки влияния различных неисправностей в системе наддува двигателя на диагностические показатели ТКР была разработана схема их взаимосвязей. При этом учитывали наиболее проявляемые в эксплуатации неисправности. Как правило, в системе впуска и выпуска это неисправности, вызванные утечками воздуха и сопротивлениями в системе. Их можно подразделить на утечки воздуха до и после компрессора и утечки до и после турбины, сопротивления до и после компрессора и сопротивления в системе выпуска. Вызваны они могут широким спектром неисправностей, как правило, это около 78 % от всего количества неисправностей в системе наддува (по данным фирмы ООО «Турбоинженеринг»).

3.2. Методика выбора параметров измерительной системы

Параметры работы измерительной системы контроля показателей турбокомпрессора преобразуются при помощи АЦП, и отображаются на ПК.

Упрощенная блок-схема измерительного комплекса представлена на (рис. 3.21).

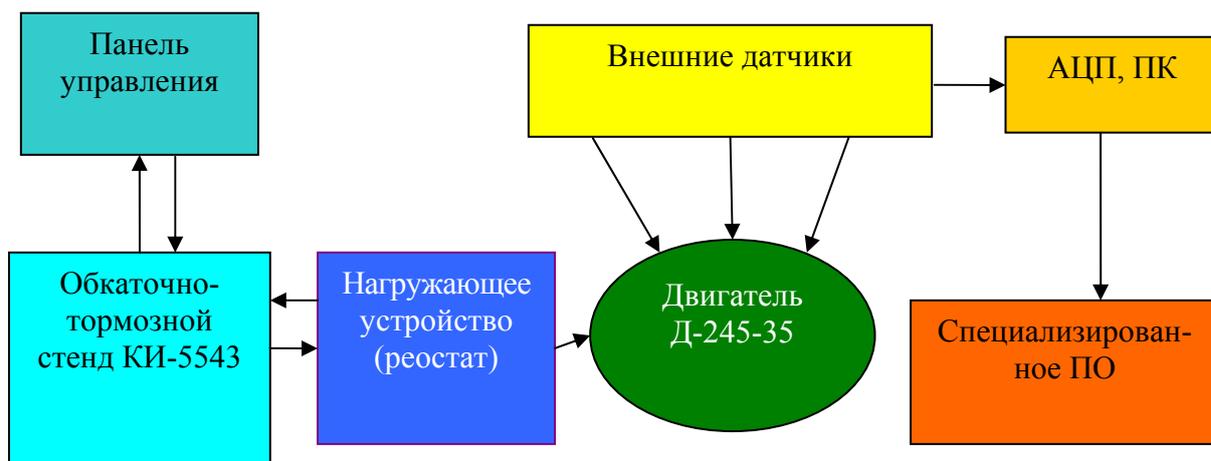


Рис. 3.21. Упрощенная блок-схема измерительного комплекса по изучению показателей работы турбокомпрессора

Процедура аналого-цифрового преобразования непрерывных сигналов, которая реализуется с помощью АЦП, представляет исходный сигнал, разложенный в последовательность чисел $U(t_n)$, $n=0,1,2,\dots$, отнесенных к некоторым фиксированным моментам времени. В основе дискретизации, т.е. преобразовании непрерывной функции $U(t)$ в последовательность $U(t)$, лежит принципиальная возможность представления их в виде взвешенных сумм [137, 182]:

$$U(t) = a_n f_n(t), \quad (3.10)$$

где a_n – некоторые коэффициенты или отсчеты, характеризующие исходный сигнал в дискретные моменты времени; f_n – набор элементарных функций, используемых при восстановлении сигнала по его отсчетам.

Наиболее распространенной формой дискретизации является равномерная, в основе которой лежит теорема отсчетов [87]. Согласно этой теореме, в качестве коэффициентов a_n необходимо использовать мгновенные значения сигнала $U(t_n)$ в дискретные моменты времени $t_n=nt$, где t – период дискретизации. Котельниковым В.А. доказана теорема для функции с ограниченным спектром, согласно которой функция полностью определяется дискретным множеством своих значений (отсчетов), взятых с частотой

$$F_0 = \frac{1}{t} = 2f_m, \quad (3.11)$$

где f_m – максимальная частота в спектре $S(j\omega)$ сигнала $U(t)$.

При этом (3.10) переходит в известное выражение из теоремы отсчетов:

$$U(t) = U(nt) \frac{\sin[2\pi F_m(t - nt)]}{2\pi F_m(t - nt)}. \quad (3.12)$$

Интерполяционный ряд сигналов данного вида носит название ряда Котельникова.

Применение равномерной дискретизации к таким сигналам приводит к возникновению, а автоматизированных системах специфических высокочастотных искажений, обусловленных выборкой. Для уменьшения этих искажений необходимо иметь в устройстве дополнительно фильтр низких частот, ограничивающий спектр исходного сигнала перед его АЦ-преобразованием.

В работе частота отсчетов определялась по формуле:

$$K_0 = K_3 \cdot 2 \cdot f_m, \quad (3.13)$$

где K_3 – коэффициент запаса, $1,5 \leq K_3 \leq 6$ [87].

Исходя из вышесказанного и условий динамического эксперимента максимальная частота в спектре сигнала $U(t)$ может быть до $f_m=100$ кГц. Соответственно тактовая частота вычислительного средства должна быть не ниже 1 МГц.

Рассмотрим статические характеристики погрешности от квантования случайного сигнала с законом распределения $p(U)$ (рис. 3.22).

Математическое ожидание погрешности от квантования при отсутствии корреляции между измеряемой величиной и погрешностью от квантования U_K проверялась по выражениям:

$$M(U_{ki}) = \int_{u_i^H}^{u_i^B} (u_i - U_K) p(u) du. \quad (3.14)$$

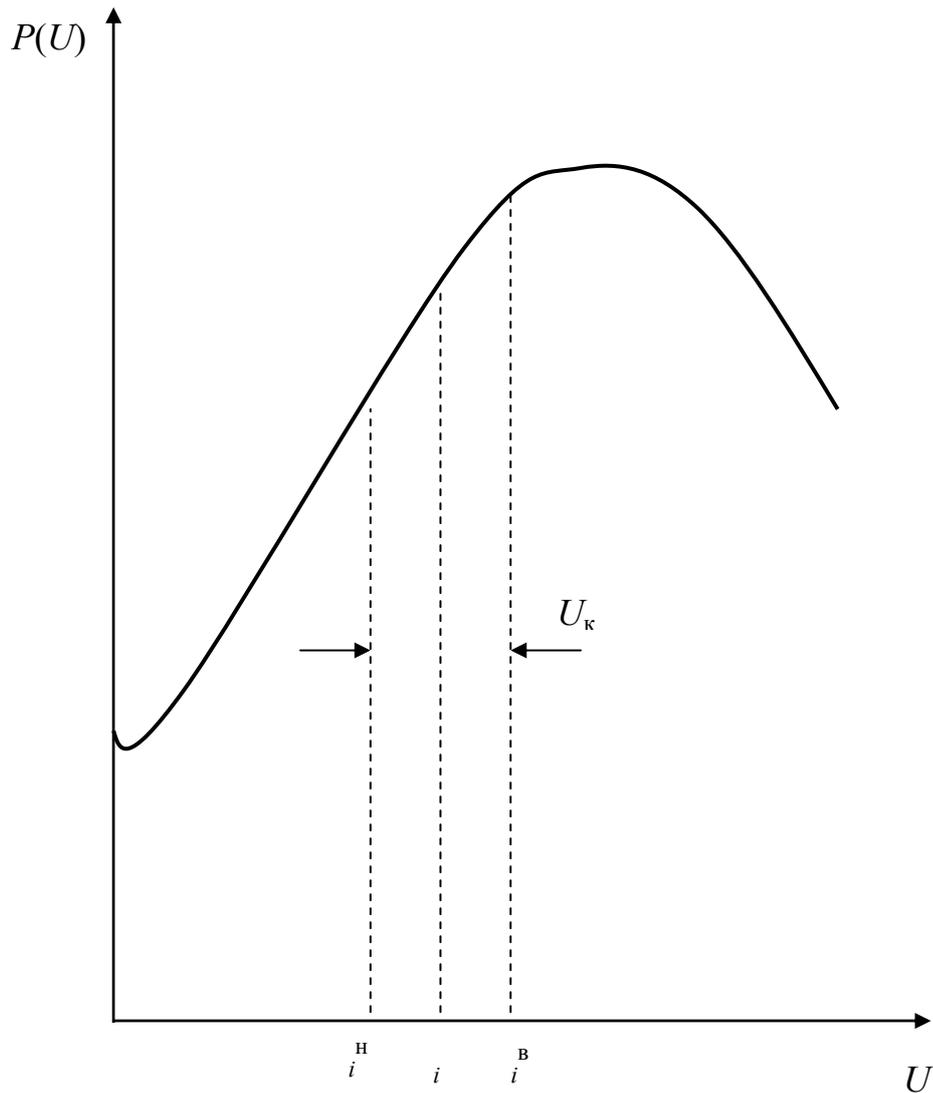


Рис. 3.22. Погрешность от квантования случайного сигнала

Дисперсия

$$D(U_{ki}) = \int_{u_i^H}^{u_i^B} (u_i - U_K)^2 p(u) du, \quad (3.15)$$

где u_i^H – нижняя граница данной ступени квантования; u_i^B – верхняя граница данной ступени квантования; u_i – значение U , соответствующее середине ступени квантования.

При большом числе ступеней квантования можно предположить, что значение плотности вероятности случайного сигнала внутри данной ступени квантования постоянно и равно $p(u_i)$ – своему значению при $u=u_i$. Тогда

$$M(U_{ki}) = p(u_i) \int_{u_i^H}^{u_i^B} (u_i - U_K) du = \frac{1}{2} p(u_i) [(u_i - u_i^B)^2 - (u_i - u_i^H)^2]. \quad (3.16)$$

Если u_i соответствует середине интервала, то $M(U_{ki})=0$.

Дисперсия погрешности

$$D(U_{ki}) = p(u_i) \int_{u_i^H}^{u_i^B} (u_i - U_K) du = \frac{1}{2} p(u_i) [(u_i - u_i^B)^3 - (u_i - u_i^H)^3]. \quad (3.17)$$

При условии, что u_i соответствует середине интервала

$$D(U_K) = \frac{1}{12} p(u) q_K^3. \quad (3.18)$$

Дисперсия погрешности от квантования с учетом изменения случайного сигнала во всем диапазоне значений от 0 до U_m

$$D(U_K) = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n p(u_i) q_{ki}^3. \quad (3.19)$$

При равномерном квантовании $q_{ki} = q_K = \text{const}$

$$D(U_K) = \frac{q_K^2}{12} \sum_{i=1}^n p(u_i) q_K.$$

При нормированном распределении случайного сигнала в диапазоне от 0 до U_m

$$\sum_{i=1}^N p(U_i) q_K = 1,$$

тогда

$$D(U_K) = \frac{q_K^2}{12}. \quad (3.20)$$

Таким образом, получено выражение для дисперсии погрешности при равномерном квантовании в случае достаточно большого числа ступеней квантования для любого закона $p(u)$.

Среднеквадратичное отклонение погрешности при равномерном квантовании

$$\sigma(\Delta U_K) = \sqrt{D(\Delta U_K)} = q_{K/2} \sqrt{3} = U_{K/2} \sqrt{3} N_n. \quad (3.21)$$

Если известно значение $\delta(U_K)$, то номинальное число ступеней квантования можно определить

$$N_N = \frac{u_n}{q_K} = \frac{u_n}{2\sqrt{3}\sigma(U_K)} = \frac{1}{2\sqrt{3}\delta(U)}. \quad (3.22)$$

Поэтому, выбирая номинальное число ступеней квантования N_N , можно достичь заданного значения $\sigma(\Delta U_K)$.

Для представления k -уровней квантования с помощью неизбыточного равномерного кода потребуется следующее число разрядов:

$$m = \log_2 N. \quad (3.23)$$

Тогда шаг равномерного квантования для однополярного сигнала:

$$q = (U_{\max} - U_{\min})/N. \quad (3.24)$$

Однако результат, определяемый выражением (3.21), относится к идеальным АЦП, у которых характеристика квантования, представляющая зависимость выходного кода от $U_{\text{вх}}$, при числе разрядов m имеет $(2^m - 1)$ ступеней, а шаг квантования q постоянен по всей характеристике.

На начальном уровне для запуска АЦП необходимо задать параметры оцифровки: частоту работы АЦП, межкадровую задержку, количество опрашиваемых каналов, режим работы (непрерывное чтение, однократное чтение), размер кольцевого буфера, параметры синхронизации, калибровка нуля, коэффициент усиления. Кроме того, необходимо указать время работы, или количество необходимых данных, учитывая частоту опроса. Данные поступают с АЦП в кольцевой буфер непосредственно в память компьютера, откуда при заполнении части буфера переписываются на диск.

Использование лабораторного измерительного комплекса позволяет изучать влияние различных эксплуатационных параметров двигателя и его неисправностей на показатели работы системы наддува с учетом различных факторов в минимальное по срокам время.

3.3. Оценка погрешностей измерения

Определение погрешностей, непосредственно измеряемых и погрешностей косвенных измерений производилось по положениям, изложенным в работах [14, 17, 81, 87, 91, 106, 114, 126, 128, 150, 164].

В качестве критериев оценки достоверности проводимых измерений использовались абсолютная среднеквадратичная и относительная среднеквадратичная погрешности.

Однократное измерение

Абсолютная среднеквадратичная погрешность результата прямого измерения

$$\sigma_n = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta a_i}, \quad (3.25)$$

где Δa_i – абсолютные предельные погрешности элементов комплекса, определяемые классом точности прибора; m – число элементов комплекса.

Относительная среднеквадратичная погрешность

$$\delta_n = \pm \frac{\sigma_n}{a_{\text{изм}}}, \quad (3.26)$$

где $a_{\text{изм}}$ – результат измерения.

Многократное измерение

$$\sigma_n = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}, \quad (3.27)$$

где a_i – результат i -го измерения; \bar{a} – среднее арифметическое n измерений; n – число измерений.

Абсолютная погрешность результата измерения:

$$\Delta a = \pm \frac{\sigma_n t_v}{\sqrt{n}}, \quad (3.28)$$

где t_v – коэффициент Стьюдента.

Относительная погрешность результата

$$\delta = \pm \frac{\Delta a}{a} \cdot 100\% \quad (3.29)$$

Косвенное измерение.

Для оценки результатов косвенных измерений величин, являющейся функцией ряда непосредственно измеряемых величин $y=f(x_1, x_2, x_3, x_4 \dots x_k)$

$$\sigma_y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}, \quad (3.30)$$

где Δx_i – абсолютная погрешность измеряемой величины.

Относительная среднеквадратичная погрешность

$$\delta_y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial \ln(f)}{\partial \ln(x_i)} \Delta x_i \right)^2}$$

Таким образом по разработке методики экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Модернизирован обкаточно-тормозной стенд КИ-5543-ГОСНИТИ для расширения технологических возможностей испытания и диагностирования автотракторных двигателей внутреннего сгорания с газотурбинным наддувом за счет оснащения современными контрольно-измерительными приборами и компьютерной системой регистрации прямых входных и выходных параметров системы наддува и двигателя.

2. Определены первичные преобразователи физических величин в аналоговые сигналы с учетом погрешности и пределов контролируемых параметров; для увеличения точности измеряемых величин и скорости передачи данных на обработку ЭВМ определена плата сбора данных с учетом количества опрашиваемых сигналов и частоты дискретизации.

2. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая проводить сбор, обработку, хранение и анализ диагностической информации, поступившей с первичных преобразователей (свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ № 2014616619 от 30.06.2014 г.).

3. Разработана методика контроля частоты вращения ротора ТКР для оценки правильности его функционирования (патент РФ на полезную модель № 145761 от 24.12.2013 г.).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТУРБОКОМПРЕССОРА В ЭКСПЛУАТАЦИИ

4.1. Анализ показателей функционирования ТКР в условиях регуляторной характеристики двигателя

При экспериментальных исследованиях изучалось изменение диагностических показателей ТКР в условиях регуляторной характеристики двигателя, в том числе при имитации различных неисправностей на впуске и выпуске. Сравнение производилось с данными, полученными путем математического моделирования, в том числе с помощью специализированного программного комплекса «Дизель РК», разработанного учеными МГТУ им. Баумана. Ниже представлены характеристики, полученные экспериментально и раскрывающие особенности формирования показателей функционирования ТКР в эксплуатации. Как видно из характеристики, представленной на (рис. 4.1) эффективная мощность $N_e = 77$ кВт двигателя Д-245-35 реализуется при частоте вращения $n_d = 2100$ об/мин, что соответствует паспортным данным завода-изготовителя на данную конструкцию двигателя [38, 39, 152].

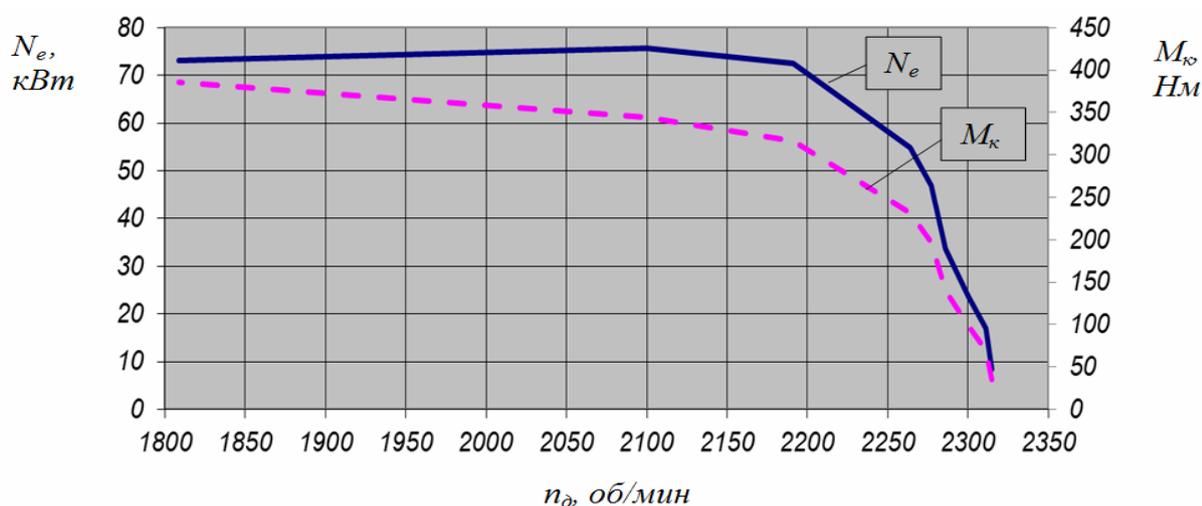


Рис. 4.1. Изменение мощности и крутящего момента двигателя Д-245-35 в условиях регуляторной характеристики

В условиях регуляторной характеристики технически исправный турбокомпрессор ТКР-6.1 имеет следующие функциональные показатели (рис. 4.2):

– максимальное значение частоты вращения вала ТКР достигается при $n_d = 2200$ об/мин и составляет $n_{tk} = 105000$ об/мин;

- степень повышения давления наддува при $n_d = 2100$ об/мин достигает значений $\pi_k = 1,52-1,53$;
- степень понижения давления отработавших газов при $n_d = 2200$ об/мин достигает значений $\pi_t = 1,58-1,60$;
- пересечение кривых π_k и π_t наблюдается при $n_d = 1970$ об/мин.

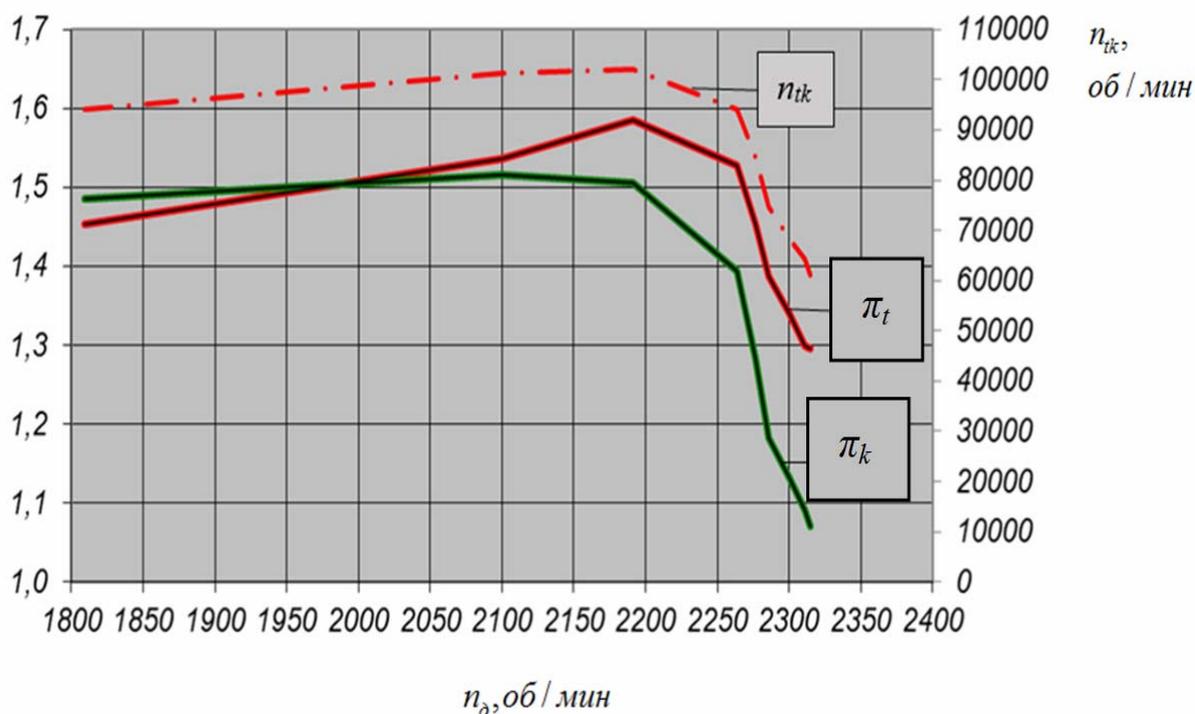


Рис. 4.2. Изменение π_k , π_t и оборотов ротора ТКР, в условия регуляторной характеристики двигателя Д-245-35

Закономерности изменения показателей функционирования турбокомпрессора в условиях регуляторной характеристики двигателя представлены в виде функций, соответствующих КПД на (рис. 4.3): $\eta_{tk} = f(n_d)$; $\eta_k = f(n_d)$; $\eta_t = f(n_d)$; $\eta_{tkm} = f(n_d)$.

Из рисунков видно, что в исправном состоянии двигателя и турбокомпрессора вблизи номинального режима значения КПД ТКР достигает паспортных значений и составляет $\eta_{tk} = 0,39 \div 0,4$. В диапазоне частот вращения двигателя от 2100 об/мин до 1800 об/мин η_{tk} сохраняет данное значение практически постоянным, что свидетельствует о высоких функциональных возможностях турбокомпрессора приспособляться к режиму работы двигателя. Правильность функционирования линии наддува отражает значение $\eta_k = 0,60$, а правильность функционирования турбины $\eta_t = 0,75$. Графики $\eta_k = f(n_d)$; $\eta_t = f(n_d)$ имеют характер, схожий с характером изменения $\eta_{tk} = f(n_d)$.

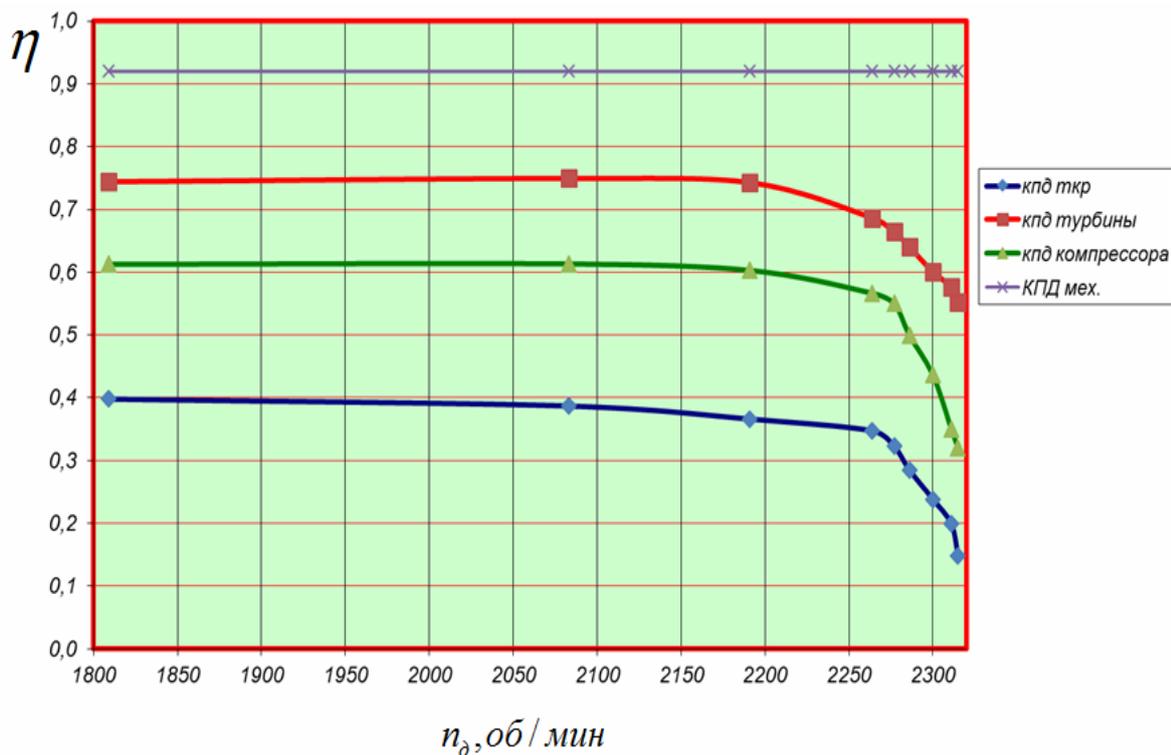


Рис. 4.3. Показатели функционирования ТКР-6.1 в условиях регуляторной характеристики двигателя

На скоростном режиме от максимального значения крутящего момента M_k до точки максимального значения мощности N_e , составляющие КПД турбокомпрессора имеют фактически линейную зависимость, а на участке регуляторной ветви повторяют кривую мощности, графики имеют вид плавных кривых без разрывов, что даёт возможность описать их аналитически.

На рис. 4.4 показано изменение частоты вращения вала ТКР совмещенное с графиком температуры T_t . Заводом-изготовителем рекомендуемая температура газа при входе в турбину составляет на контрольном режиме не более $600+25\text{ }^\circ\text{C}$ [5].

Как видно из графиков в исправном состоянии двигателя и турбокомпрессора температура газов перед турбиной достигает значений $T_t = 600\text{ }^\circ\text{C}$ на режиме близком к максимальному крутящему моменту.

Представленные закономерности указывают на существенную зависимость параметров: частоты вращения вала турбокомпрессора, π_k , π_t , а также КПД ТКР и его составляющих от скоростного и нагрузочного режимов работы двигателя. Наибольшую информативность о состоянии турбокомпрессора несут режимы работы двигателя близкие к номинальным.

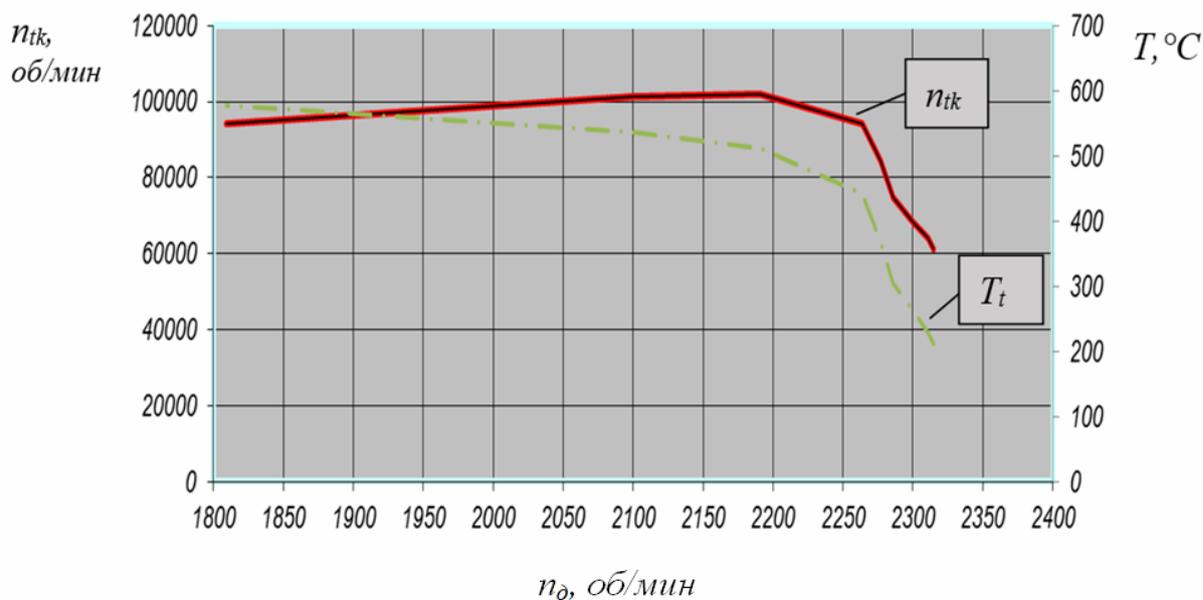


Рис. 4.4. Изменение температуры газов T_t и оборотов ТКР в условиях регуляторной характеристики

Полученные закономерности изменения показателей являются базовыми при дальнейшей работоспособности ТКР в эксплуатации, в том числе в случае появления неисправностей в системе ГТН.

4.2. Результаты проверки адекватности математической модели

Проверка адекватности математической модели проводилась для теоретических уравнений по установлению η_{tk} и значениям η_{tk} , полученным в результате проведенных экспериментальных исследований турбокомпрессора на различных скоростных режимах работы двигателя.

Также данные теоретических исследований были подтверждены расчетами в программном комплекса «Дизель РК», фрагмент расчета представлен в приложении. Как видно из рис. 4.5 графики имеют схожий характер изменения. Максимальное расхождение теоретической и экспериментальной зависимостей во всем скоростном диапазоне соответствует $\Delta \eta_{tk} = 0,04$, а коэффициент корреляции находится в диапазоне 0,88...0,94.

Граница номинальных значений η_{tk} турбокомпрессора ТКР 6 для экспериментальных и теоретических зависимостей составляет $\eta_{tk} = 0,4$ и в обоих случаях своего максимума функции достигают на участке максимального крутящего момента.

Таким образом, сумма полученных результатов позволяет сделать обоснованный вывод [169] об адекватности математической модели.

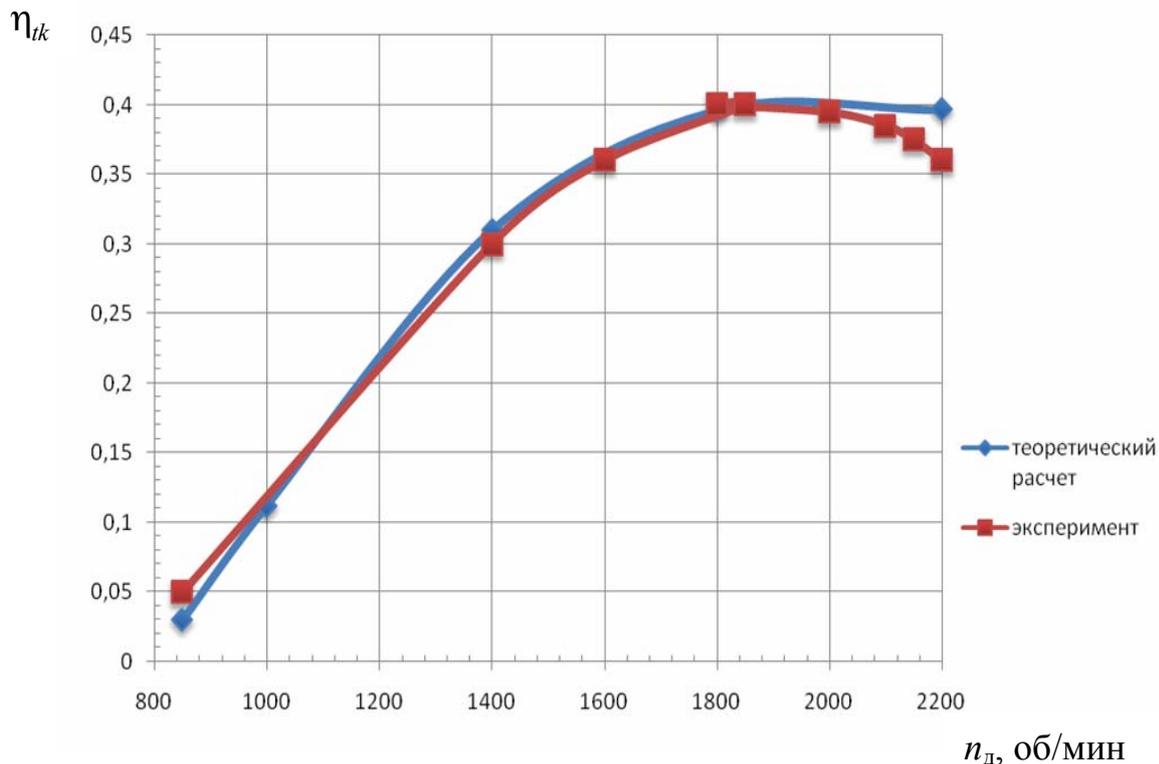


Рис. 4.5. Теоретическая и экспериментальная зависимости η_{ik} на различных скоростных режимах работы двигателя

4.3. Изменения показателей правильного функционирования ТКР при имитации неисправностей в системе наддува

При диагностировании ТКР по параметрам КПД турбокомпрессора и его составляющим большое значение имеют экспериментальные характеристики двигателя, полученные при наличии характерных неисправностей в системе наддува. С этой целью согласно методике экспериментальных исследований была проведена серия опытов при имитации характерных неисправностей в системе наддува во время работы двигателя на различных скоростных и нагрузочных режимах.

На рис. 4.6 показаны графики изменения КПД турбокомпрессора и его составляющих при имитации утечек газа перед турбиной. Величина утечек газа во время опытов контролировалась по величине давления газов в линии нагнетания и составляла 10 % от номинального расхода воздуха.

Основной задачей, которая ставилась в опытах, являлось установление влияния неисправности на показатели функционирования турбокомпрессора и дальнейшего использования полученных закономерностей для распознавания характерных неисправностей.

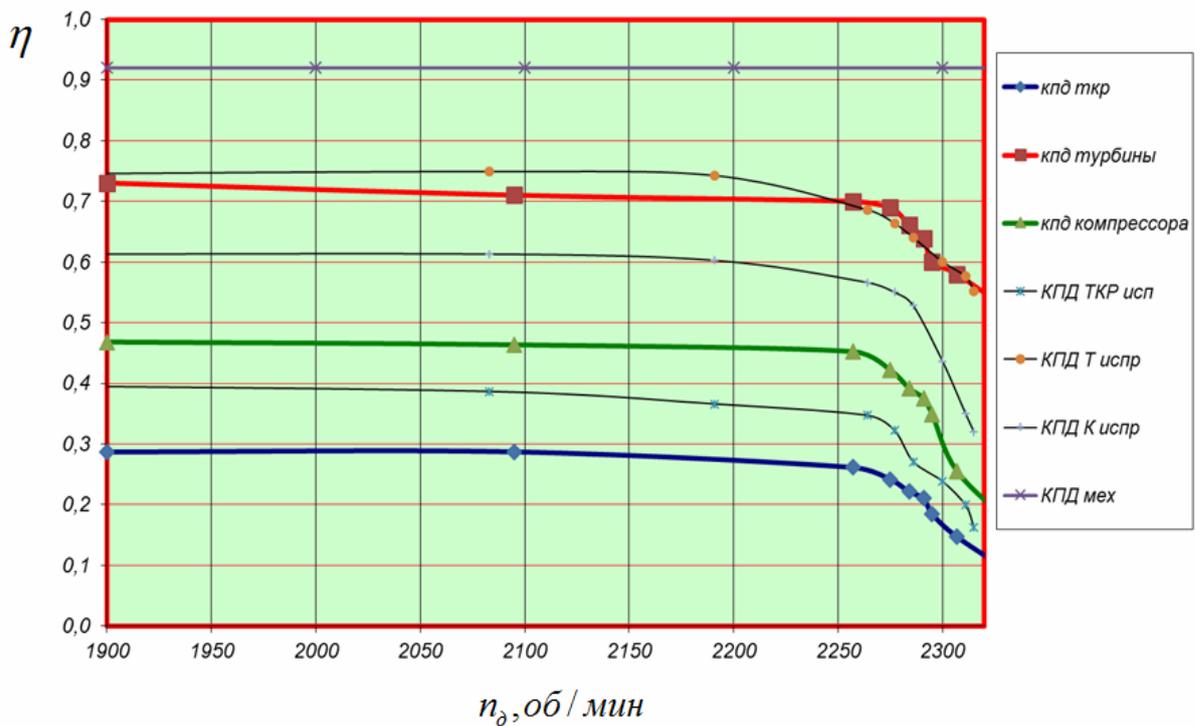


Рис.4.6. Показатели функционирования ТКР-6.1 в условиях регуляторной характеристики двигателя (неисправность линии впуска – утечки после компрессора)

Как было отмечено ранее, наиболее явно нарушение правильного функционирования турбокомпрессора проявляется с ростом нагрузки двигателя. Утечки воздуха после компрессора, являются широко распространенной неисправностью в системе наддува [54, 60]. Возникновение данного рода неисправности происходит, как правило, в результате повреждения интеркуллера, разрыва резинотехнических изделий (патрубков), либо ослабления хомутов их крепления. При возникновении утечек происходит снижение КПД турбокомпрессора до граничных значений по критерию теплонапряженности. Эксплуатация в таких условиях может привести к выходу из строя как деталей цилиндро-поршневой группы двигателя, так и ТКР в целом.

Закономерность изменения показателей работы двигателя с электронными системами управления показана ранее. В данном случае причиной значительного снижения КПД турбокомпрессора, послужило падение КПД компрессора. Его значение снизилось с 0,60 до 0,45. Также заметно небольшое снижение КПД турбины в диапазоне оборотов двигателя от 2250 до 1900 об/мин. Снижение η_{tk} обусловлено снижением наполняемости цилиндров. В зоне значений максимального крутящего момента η_{tk} почти достигает паспортных значений.

Данная неисправность опасна как на номинальных режимах, так и на режиме холостого хода. На режиме холостого хода, когда работа турбокомпрессора не эффективна и может дополнительно создавать сопро-

тивление всасыванию воздуха, может наблюдаться забор неочищенного воздуха, что приведет к повышенному износу цилиндропоршневой группы двигателя.

При возникновении неисправностей связанных с утечками газов перед турбиной значение КПД ТКР также не достигает своего паспортного значения, и в диапазоне частот вращения двигателя от 2100 до 1850 об/мин составляет всего $\eta_{tk} = 0,19 \div 0,20$. Значения η_{tk} на номинальном режиме работы двигателя снижаются ниже предельного по критерию теплонапряженности двигателя, в связи с этим тепловой режим работы турбокомпрессора резко повышается. Дальнейшая эксплуатация может привести к серьезным поломкам.

График линии наддува имеет резкий перегиб при частоте вращения двигателя 2260 об/мин, η_k на участке внешней скоростной характеристики имеет почти неизменное низкое значение $\eta_k = 0,39 \div 0,40$.

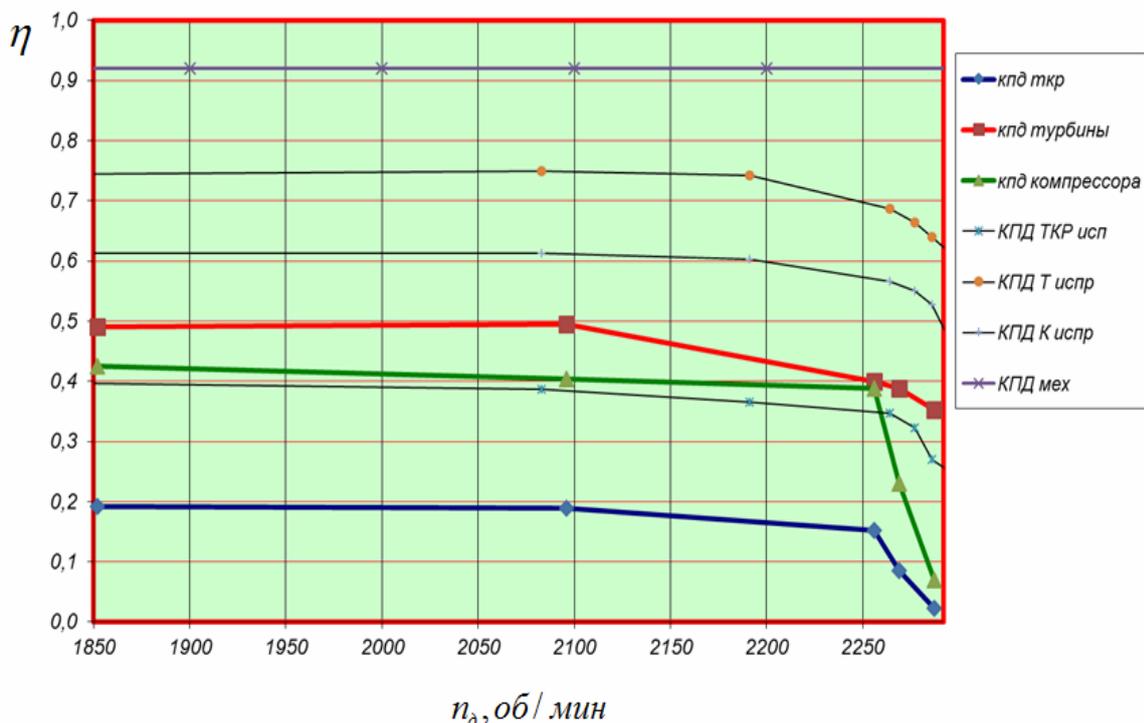


Рис. 4.7. Показатели функционирования ТКР-6.1 в условиях регуляторной характеристики двигателя (неисправность линии выпуска – утечки перед турбиной)

График изменения η_t имеет характер более схожий с КПД турбокомпрессора, максимальное значение $\eta_t = 0,50$ достигается при частоте вращения двигателя 2100 об/мин, соответствующей режиму максимальной мощности двигателя. Как видно при данной неисправности неизменным остается лишь η_{tkm} , так как характер неисправности не влияет на величину сопротивления вращению вала турбокомпрессора.

В эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники часто неправильное функционирование турбокомпрессора вызывается неисправностями системой отвода отработавших газов (забит сажевый фильтр, замяты патрубки и др.). На рис. 4.8 показаны распределения показателей функционирования турбокомпрессора при неисправностях на линии выпуска. Из графика видно, что данная неисправность наиболее сильно отражается на КПД турбины η_t , снижая его номинальное значение на $\Delta\eta_t = 0,07$. Характер кривизны графика становится более плавным по сравнению с исправным состоянием, прямолинейность графика наблюдается в более узком диапазоне частот вращения вала двигателя от 1850 до 2050, в диапазоне от 2050 до 2200 наблюдается падение значений КПД турбины до $\eta_t = 0,62$, при этом снижается эффективность турбины на режиме номинальной мощности двигателя. Снижение параметров η_t, η_k в совокупности сказывается на формировании КПД турбокомпрессора η_{tk} , происходит его снижение на $\Delta\eta_{tk} = 0,05$ во всем диапазоне работы двигателя.

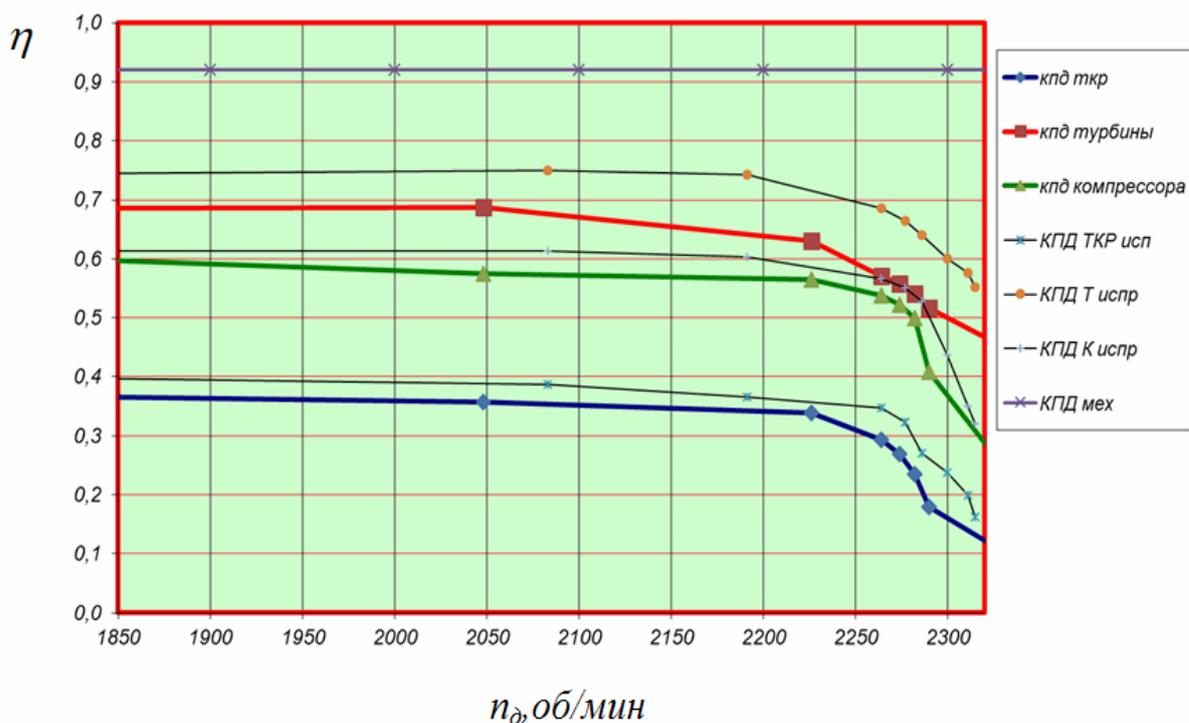


Рис. 4.8. Показатели функционирования ТКР-6.1 в условиях регуляторной характеристики двигателя (неисправность линии выпуска – противодавление)

На основании ранее изложенного во второй главе распределения КПД турбокомпрессора по зонам можно сделать заключение, что КПД турбокомпрессора η_{tk} попадают в зону 2, требующей вмешательства мастеров при ближайшем техническом обслуживании.

Засоренность воздушного фильтра также может быть источником неправильного функционирования турбокомпрессора в эксплуатации.

Проявление данной неисправности на номинальном режиме может стать причиной входа турбокомпрессора в состояние помпажа, при котором происходит процесс интенсивного разрушения турбокомпрессора. В режиме работы холостого хода данная неисправность опасна возникновением утечек масла через уплотнения среднего корпуса ТКР. Также возможно проникновение частиц пыли через чрезмерно засоренный фильтр, что может стать причиной абразивного износа корпуса компрессора и компрессорного колеса.

На рис. 4.9 указаны закономерности изменения η_{tk} и его слагаемых при повышенной засоренности фильтра. Как видно из графика засоренность практически не влияет на характер изменения η_{tk} , но изменяет характер η_k , η_t . В диапазоне частот вращения, соответствующих максимальному крутящему моменту, происходит снижение значения КПД компрессора до $\eta_k = 0,55$. Особенностью является характер изменения кривых η_k , η_t на регуляторной ветви, практически во всем диапазоне регуляторной ветви график η_t находится ниже графика η_k .

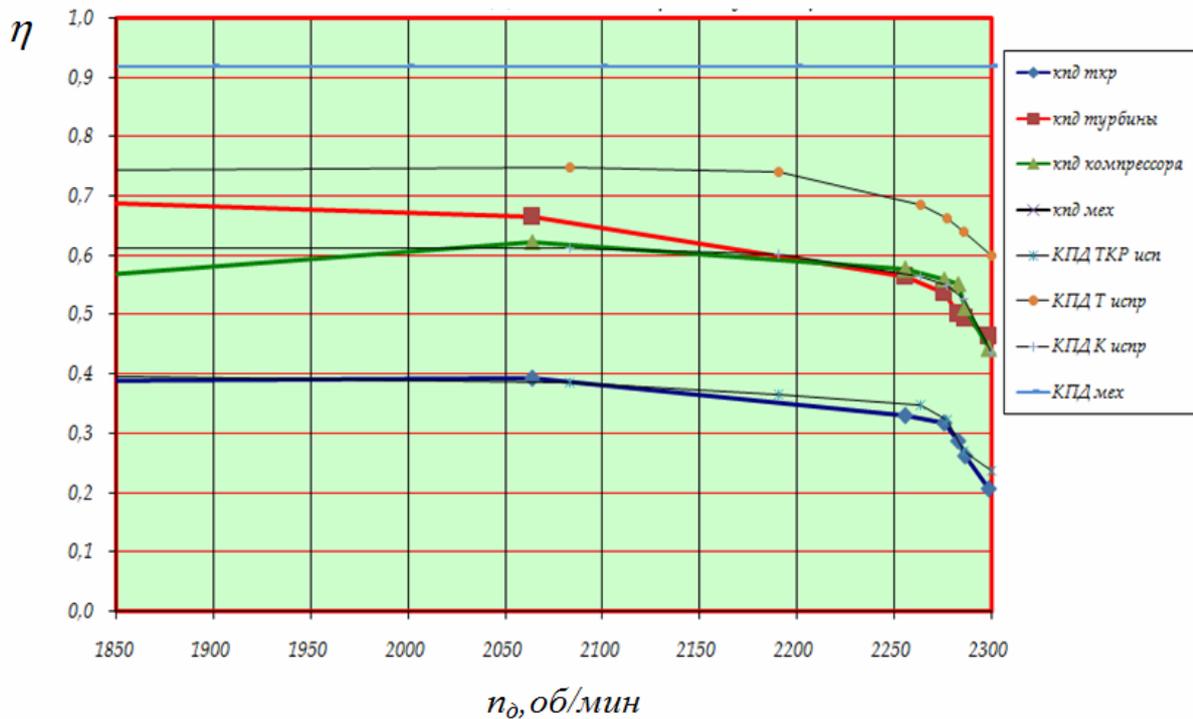


Рис. 4.9. Показатели функционирования ТКР-6.1 в условиях регуляторной характеристики двигателя (неисправность линии впуска – повышенное сопротивление фильтра)

В работе одним из этапов исследований, явился анализ разгонных характеристик турбокомпрессора. Данные характеристики изучались также в условиях наличия неисправностей в системе наддува. Динамика изменения различных разгонных характеристик ТКР представлена на (рис. 4.10).

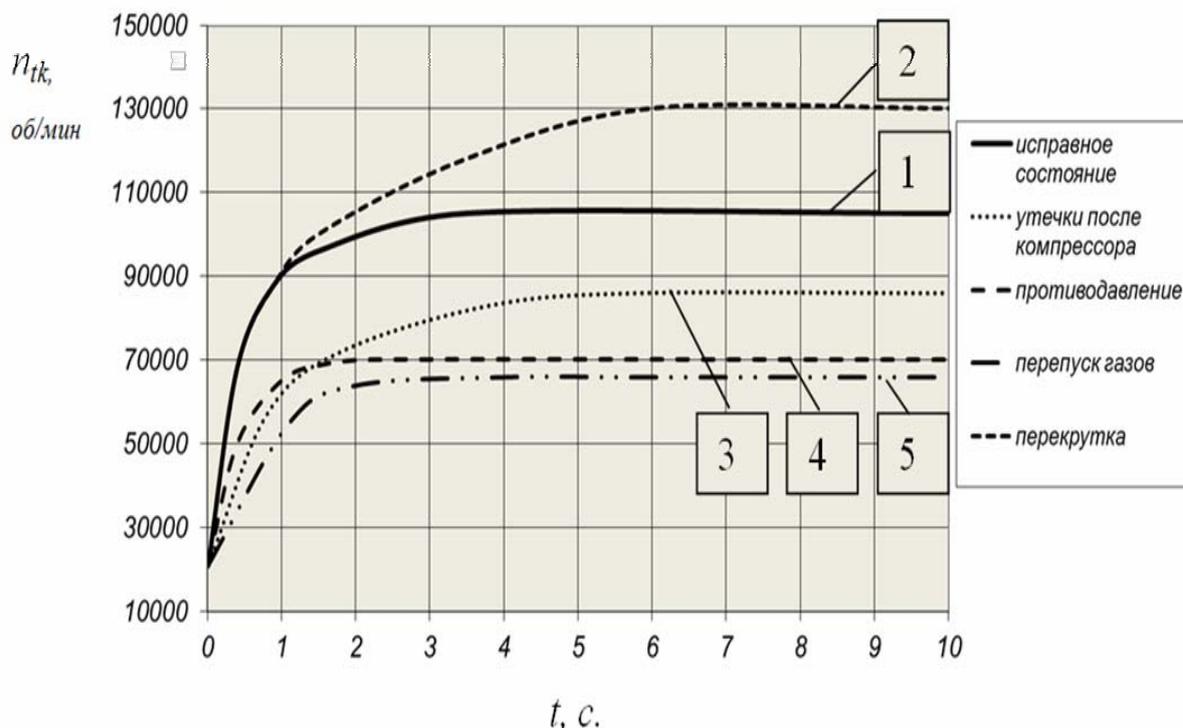


Рис. 4.10. Графики разгонных характеристик турбокомпрессора при различных неисправностях

Из графиков видно, что наличие неисправностей влечет за собой изменение в динамике разгона ротора турбокомпрессора. При неисправности в системе управления турбокомпрессором возникает состояние, при котором частота вращения ротора достигает величин, превышающих номинальное амплитудное значение частоты вращения вала ТКР. Присутствие данного рода неисправности при эксплуатации турбокомпрессора приводит к увеличению динамических нагрузок, приводящих к дефектам турбины. В данном случае разгонные характеристики ТКР изменяются и принимают следующий вид (рис. 4.10, кривая 2).

Наличие неисправности в виде утечек воздуха после компрессора вызывает снижение амплитудного значения частоты вращения до 86000 об/мин, при этом величина времени разгона до этого амплитудного значения составляет $\tau = 5,5$ с. Неисправности в виде утечек газа перед турбиной вызывают снижение амплитудного значения частоты вращения до 65000 об/мин, при этом время разгона до этого амплитудного значения n_{tk} составляет $\tau = 2,5$ с.

Неисправности в виде противодавления отработавших газов после турбины вызывает снижение амплитудного значения частоты вращения до 67000 об/мин, при этом время разгона до этого амплитудного значения составляет $\tau = 1,5$ с. В исправном состоянии амплитудное значение n_{tk} составляет 105000 об/мин при времени разгона $\tau = 3$ с, а времени разгона до $n_{tk} = 67000$ об/мин составляет $\tau = 0,4$ с. Таким образом, наличие неис-

правностей в системе газотурбинного наддува увеличивает время выбега ротора, и снижает амплитудное значение частоты вращения вала ТКР.

1. Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические исследования о том что, правильность функционирования ТКР в эксплуатации может быть оценена системой показателей: КПД турбокомпрессора и частотой вращения ротора во всем диапазоне изменения скоростного режима работы двигателя. Получены количественные оценки показателей правильного функционирования турбокомпрессора в условиях регуляторной характеристики двигателя на номинальном режиме $n_{tk} = 105000$ об/мин; $\eta_{tk} = 0,40$; $\eta_k = 0,62$; $\eta_t = 0,75$; $\eta_{tkm} = 0,92$; $\pi_k = 1,52 \div 1,53$; $\pi_t = 1,58 \div 1,60$.

2. Получен диапазон численных значений предельных по теплонапряженности КПД ТКР в условиях регуляторной характеристики при частоте вращения двигателя от 1200 до 1800 об/мин. Экспериментальные данные совпадают с данными, полученными на математической модели с коэффициентом корреляции 0,88...0,94.

3. Эксперименты, проведенные при имитации различных неисправностей в системе ГТН подтвердили, что функционирование ТКР с неисправностями сопровождаются снижением КПД ТКР, частоты вращения и ростом теплонапряженности. Предельное значение КПД турбокомпрессора по критерию теплонапряженности двигателя $q_{п}=6$, на скоростном диапазоне работы двигателя $n_{д}=1800-2200$ об/мин составляет $\eta_{tk_пред} = 0,34 \div 0,36$.

4. Неисправности в системе наддува отражаются на форме разгонных характеристик в виде отклонения от исправного состояния, как амплитудных значений, так и времени разгона. Для характерных неисправностей (утечки воздуха после компрессора, утечки газов перед турбиной, повышенное противодавление газов на выпуске, повышенное сопротивление вращению ротора, «перекрутка» ротора) получены формы разгонных характеристик турбокомпрессора, что дает возможность их сравнения с аналогичными, полученными в результате математического моделирования.

5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

5.1. Технология диагностирования технического состояния правильного функционирования турбокомпрессора

Выполнение ТО относится к числу ответственных и трудоемких работ по поддержанию агрегатов в работоспособном состоянии. Одним из путей, обеспечивающих снижение трудоемкости и повышения качества выполнения ТО, является внедрение в этот процесс новых средств и методов диагностирования [92, 94].

Современная тенденция развития средств диагностики предполагает наличие оборудования, позволяющего проводить безразборную диагностику узлов и агрегатов [80]. Как было изложено выше, до последнего времени диагностика турбокомпрессоров производится органолептическими методами, либо путем измерения структурных параметров, требующего разборки агрегата. Разработанная автором методика диагностирования турбокомпрессоров относится к безразборным моторным методам и может быть использована при проведении различных видов технического обслуживания на станциях технического обслуживания, сервисных центрах и ремонтных предприятиях [86, 173, 174]. При разработанном методе диагностирования операции монтажа датчиков и их подключение производятся без демонтажа турбокомпрессора с двигателя и полной, либо частичной его разборки. Обработка данных производится при помощи ЭВМ, что позволяет повысить производительность труда мастера-диагноста. Заложенный в программное обеспечение принцип локализации неисправности дает возможность повысить качество диагностических работ и при этом снизить требования к квалификации мастеров. Универсальность разработанного оборудования делает его незаменимым в линейке приборов, необходимых для диагностики системы наддува автотракторных двигателей.

Наибольшую эффективность использования любого диагностического оборудования можно получить при правильном обращении с приборами, средствами и при рациональной технологии диагностирования [153].

Диагностирование системы наддува автотракторного двигателя производится в соответствии с технологией, изложенной в табл. 5.1.

Диагностирование начинается с опроса оператора о работе двигателя и его систем, изменения внешних органолептических параметров, позволяющего составить представление о наличии неисправности в определенных системах и оценить техническое состояние двигателя. Затем производится внешний осмотр двигателя и детальный осмотр турбокомпрессора на предмет наличия гидравлических утечек газов и жидкостей, механических повреждений и разрывов патрубков. При отсутствии внешних

признаков неисправности турбокомпрессора его диагностика проводится в следующем порядке, указанном в табл. 5.1.

Т а б л и ц а 5.1

Технология диагностирования турбокомпрессора автотракторного двигателя

№ п/п	Контрольно-диагностическая операция	Трудоемкость, чел.-ч.	Инструмент, приспособления	Указания и технические требования
1	2	3	4	5
1	Опрос диагноста о работе двигателя	0,015	-	Предварительно составить представление о наличии неисправностей и оценить техническое состояние системы наддува на основании полученной информации
2*	Проверка комплектности	-	-	
3*	Подготовка турбокомпрессора к диагностированию	-	Моечное средство, щетка, чистая тряпка	Убрать грубые отложения, и произвести внешний осмотр на предмет механических повреждений
4	Проведение I режима диагностирования	0,03	Набор инструмента	Установить датчик частоты вращения вала турбокомпрессора. Следить за тем, чтобы трассировка (расположение) проводов не проходило вблизи вращающихся деталей двигателя и горячих деталей системы выпуска. После проведения диагностирования провести операции снятия датчика
5	Анализ диагностической информации, полученной на I режиме диагностирования	0,015		<p>При $\frac{n_{т3}}{n_t} = 1$ турбокомпрессор правильно функционирует.</p> <p>При $\frac{n_{т3}}{n_t} > 1$ имеет место нарушение в системе управления турбокомпрессором, при дальнейшем обследовании системы необходимо обратить внимание на целостность регулирующих элементов, закрепленность тяг. При обнаружении дефекта «сбиты настройки» требуется настройка системы управления, при обнаружении дефектов клапана, необходимо заменить неисправные детали и провести регулировку.</p> <p>При $\frac{n_{т3}}{n_t} < 1$ имеет место неисправности, требующие уточнения на II режиме диагностирования</p>

Окончание табл. 5.1

1	2	3	4	5
6	Подготовка турбокомпрессора к II режиму диагностирования	0,03	Комплект переходных проставок, набор инструмента, ПК, программное обеспечение, измерительная система	Установить переходные проставки, подключить датчики температуры и давления. Запустить программу для ЭВМ. Провести пробное снятие характеристик
7	Проведение II режима диагностирования	0,03	ПК, программное обеспечение, измерительная система	Снятие диагностической информации на различных режимах работы двигателя. Обработка данных в программе для ЭВМ «Программа определения технического состояния турбокомпрессора»
8	Анализ диагностической информации, полученной на II режиме диагностирования	0,015	Данные завода-изготовителя	Сопоставление установленных в процессе диагностирования значений КПД ТКР и его составляющих, с паспортными данными завода-изготовителя. При снижении значений η_k будет иметь место неисправность. Локализация неисправности уточняется по значениям и характерам графиков $\eta_k, \eta_t, \eta_{tkm}$ при снижении показателей η_k имеет место неисправности линии нагнетания (гидравлические утечки, засоренность фильтра, абразивный износ компрессорного колеса); при снижении показателей η_t имеют место неисправности линии отвода отработавших газов (перепуск газов перед турбиной по причинам: неисправность клапана, повреждении сильфонов, прокладок; противодавление по причинам: неисправность сажевого фильтра, механическое повреждение системы отвода (замятие)); при снижении показателей η_{tkm} имеет место наличие неисправностей среднего корпуса ТКР обусловленные повышенным сопротивлением вращению
9	Диагностический вывод	0,015	-	Принять решение о дальнейшей эксплуатации, ремонте, замене агрегата
* Работа не является диагностической, а относится к числу операций подготовки				

Для проведения рационального процесса определения технического состояния турбокомпрессора в предлагаемой методике процесс диагностирования разбивается на два этапа (режима). На первом этапе мастер-диагност производит контроль параметров частоты вращения вала турбокомпрессора при помощи разработанного устройства определения частоты вращения вала турбокомпрессора (патент на полезную модель РФ № 145761 от 24.12.2013 г.). При $\frac{n_{тэ}}{n_t} < 1$ неисправность заключается в наличии гидравлических утечках в турбокомпрессоре, либо повышенном сопротивлении вращению вала ТКР. При $\frac{n_{тэ}}{n_t} > 1$ неисправна система управления турбокомпрессором, либо нарушена регулировка системы. На основе полученной диагностической информации, а именно по отношению $\frac{n_{тэ}}{n_t}$ мастер-диагност сможет сделать заключение о техническом состоянии узла, частично локализуя неисправность на первом этапе. В случае $\frac{n_{тэ}}{n_t} < 1$ мастер-диагност имеет дело с неоднозначностью неисправности, требующей уточнения на втором режиме.

На втором режиме при помощи программы для ЭВМ «Программа определения технического состояния турбокомпрессора» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014616619) и разработанных приборных средств, производится детальное диагностирование эффективности работы турбокомпрессора, следующим образом. Вначале вместо штатных патрубков устанавливаются патрубки, имеющие входные отверстия под датчики температуры и давления. Затем полученные данные вводятся в программное обеспечение, где происходит расчет значений КПД турбокомпрессора. Рассчитанные значения КПД турбокомпрессора сверяются с установленными по данным завода-изготовителя. Снижение одного из параметров дает возможность окончательной локализации неисправности.

При проведении подготовительных и диагностических работ необходимо соблюдать установленные правила техники безопасности в соответствии с содержанием проводимых операций.

Таким образом, как видно из табл. 5.1 весь процесс определения работоспособности турбокомпрессора дизельного двигателя при помощи разработанной методики составляет от 15 до 30 минут.

На рис. 5.1 показан алгоритм действий при типовой и предлагаемой технологиях диагностирования. Типовая технология диагностирования турбокомпрессора предусматривает измерение структурных параметров агрегата и проверку на специализированном стенде марки «TurboTest» СИМАТ, для чего, требуется демонтаж ТКР с двигателя. В предлагаемой

технологии возможно сокращение времени диагностирования, за счет проведения моторной диагностики турбокомпрессора. На рис. 5.2 показаны сравнение предлагаемой технологии с действующей.

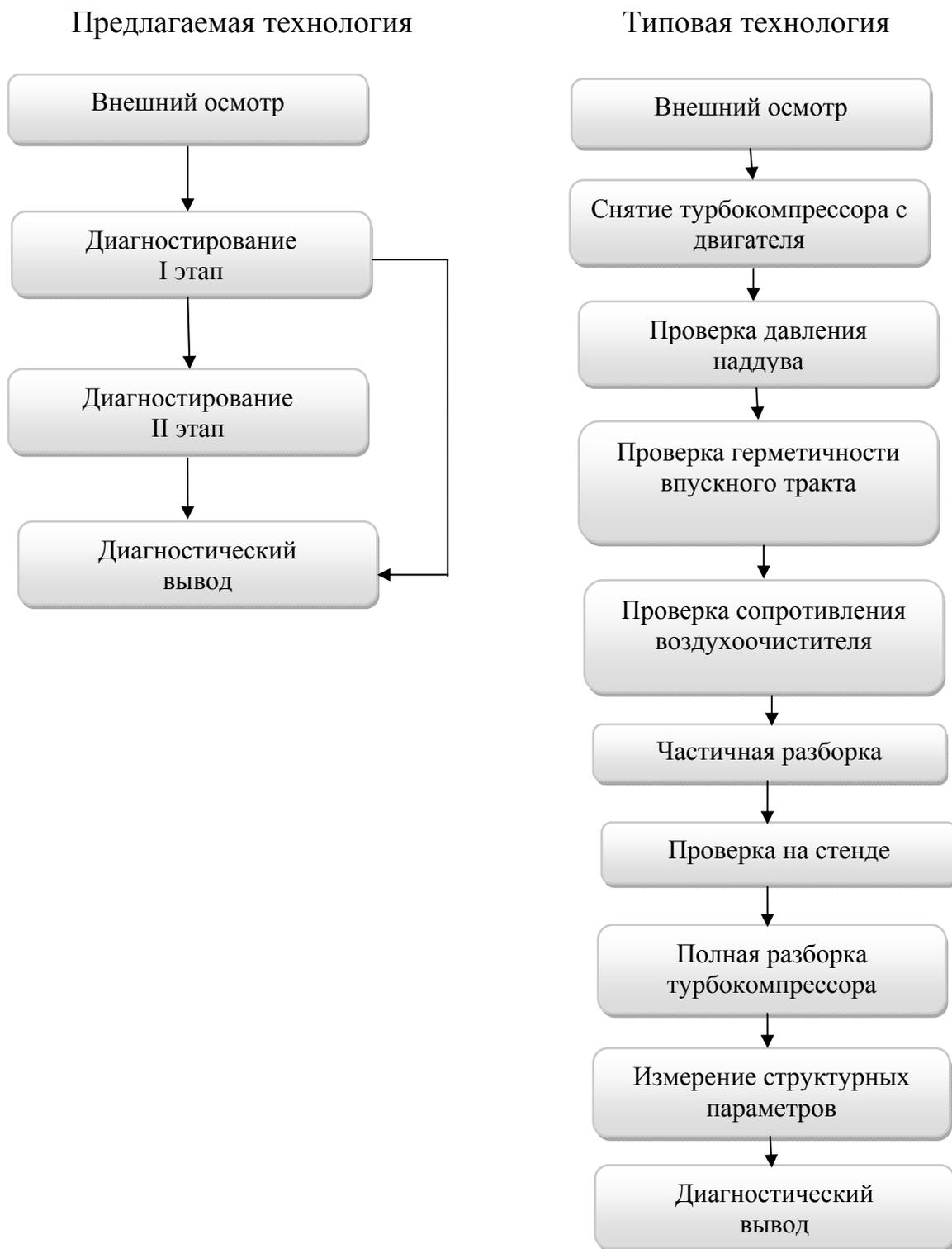


Рис. 5.1. Технологии диагностирования



а) выворачивание штатной заглушки во впускном коллекторе



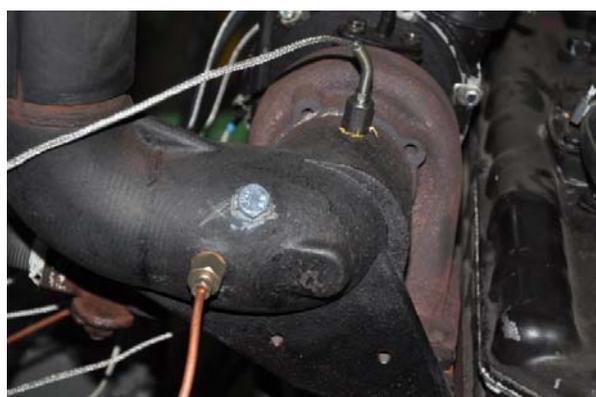
б) установка переходного штуцера



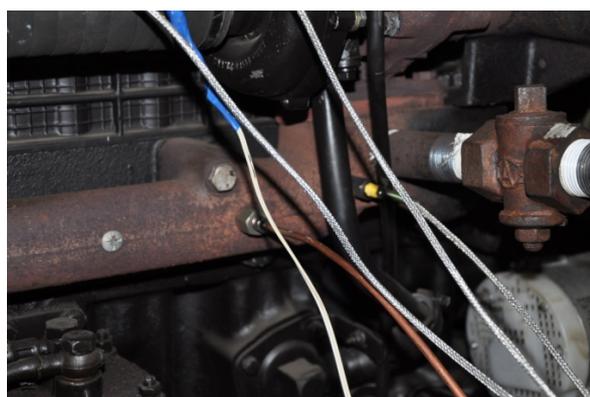
в) установка датчика давления и термопары во впускной коллектор



г) монтаж датчика давления в выпускной коллектор



д) установка датчика давления и термопары в систему выпуска



е) установка термопары в выпускной коллектор

Рис. 5.2. Подготовка к диагностированию системы газотурбинного наддува

Графическая составляющая карт диагностирования турбонаддува при помощи разработанного метода показана на рис. 5.3.



а) предварительная проверка
и запуск программы ЭВМ



б) анализ результатов диагностирования

Рис. 5.3. Диагностирование

После проведения процесса диагностирования необходимо установить технологические заглушки на свои штатные места, снять переходные проставки. На рис. 5.4 показана подготовка двигателя после проведения диагностирования.



а) установка заглушки в выпускной
коллектор



б) установка заглушки во впускном
коллекторе

Рис. 5.4. Подготовка двигателя к эксплуатации после диагностирования

5.2. Технология встроенной системы диагностирования диагностирования технического состояния турбокомпрессора

Большинство современных автомобилей оснащается достаточным количеством датчиков для отслеживания технического состояния элементов автомобиля от которых сигналы поступают на электронный блок управления (ЭБУ). Для прочтения информации от ЭБУ предусмотрен диагностический разъем. В настоящее время наибольшее распространение получил интерфейс OBD-II. Но данные от ЭБУ необходимо расшифровывать с помощью специальных адаптеров и необходимого программного контента.

Для автомобиля КАМАЗ-4308 применяют бортовой компьютер (БК) на основе ЭБУ (ECM Cummins). Работу ECM Cummins предназначен контролировать адаптер Cummins inline 6 и программа Cummins insite 7.5 (данные версии в настоящее время являются самыми востребованными). Но стоимость такого комплекта в России составляет порядка 80000 рублей. Кроме управления двигателем, ЭБУ, получает сигналы со всех основных узлов и агрегатов. Обработанные сигналы можно прочесть, с помощью специального адаптера (рис. 5.5) подключившись к диагностическому разъему.

БК позволяет отобразить различные параметры: время в пути, время в движении, пройденный путь, общий расход топлива, расход топлива на холостом ходу, текущую скорость, а также широкий спектр величин, рассчитанных на их основе (средняя скорость пути, средняя скорость движения и т.д.).

Диагностический сканер имеет следующие функциональные возможности:

- Работа по протоколу OBD-2.
- Считывание кодов неисправностей.
- Удаление кодов неисправностей.
- Вывод параметров реального времени.
- Вывод результатов внутренних тестов системы самодиагностики.
- Считывание VIN-кода (для автомобилей с 2004 г.в.).
- Расширенные функции (зависят от программного обеспечения).
- Версия прошивки микроконтроллера ELM: 1.4.

Список контролируемых автосканером параметров узлов: аккумулятор, антиблокировочная система тормозов, аудио система, газоразрядная лампа, генератор, гидроусилитель руля, датчик угла поворота рулевого колеса, двери, двигатель, зеркала, иммобилайзер, климат-контроль, колеса, кондиционер, круиз-контроль, кузов, GPS-навигация, парктроник, пневматическая подвеска, подушки безопасности, приборная панель, радио, ручной тормоз, салон, сидения, телевизор, тормозная система, трансмиссия, тяги, центральный замок.

D1

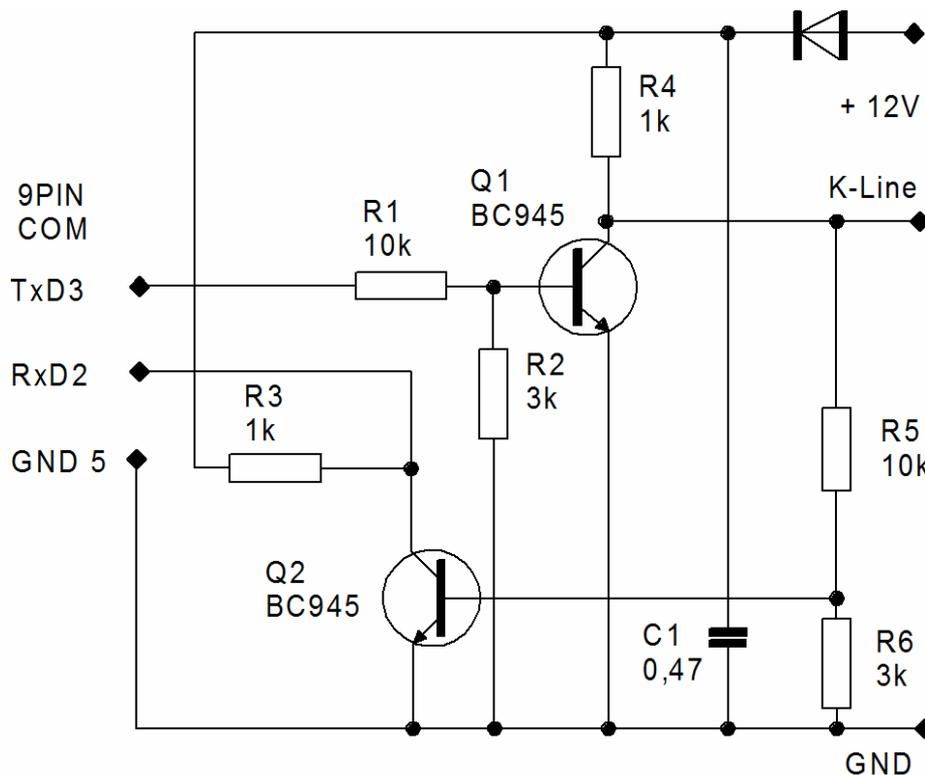


Рис. 5.5. Принципиальная схема адаптера:

R1-R6 – сопротивления; C1 – конденсатор; Q1, Q2 – транзисторы; D1 – диод

Алгоритм (рис. 5.6) функционирования встроенной системы диагностирования следующий:

- Производится опрос клавиатуры и, в случае необходимости, модификация выбранного режима работы.
- Формируется запрос на ЭБУ, соответствующий заданному режиму работы. Виды запросов весьма многообразны, однако их содержание (за небольшим исключением, например запросов на изменение состояния исполнительных механизмов) постоянно.
- Ожидается ответ от ЭБУ и осуществляется прием данных при его получении. По истечении времени ожидания или завершении приема данных производится анализ сложившейся ситуации и в соответствии с ней возможна модификация заданного режима работы. При необходимости обновляется информация на индикаторе с преобразованием полученных из ЭБУ данных. Информация для пользователя должна выводиться в удобной форме, т.е. в виде развернутых буквенно-цифровых сообщений и подсказок, что требует применения знаковосинтезирующего индикатора. Объем информации для отображения в развернутом виде очень большой, что влечет за собой увеличение памяти для ее хранения. Полученные из ЭБУ данные, в некоторых случаях, должны быть пересчитаны по несложной формуле (точность вычислений при этом может быть невелика) и преобразованы из двоичной формы в символьный формат.

- Делается пауза, т.к. согласно протокола запросы на ЭБУ должны выдаваться не раньше 100 мс по окончании предыдущего сеанса обмена, и все повторяется сначала.

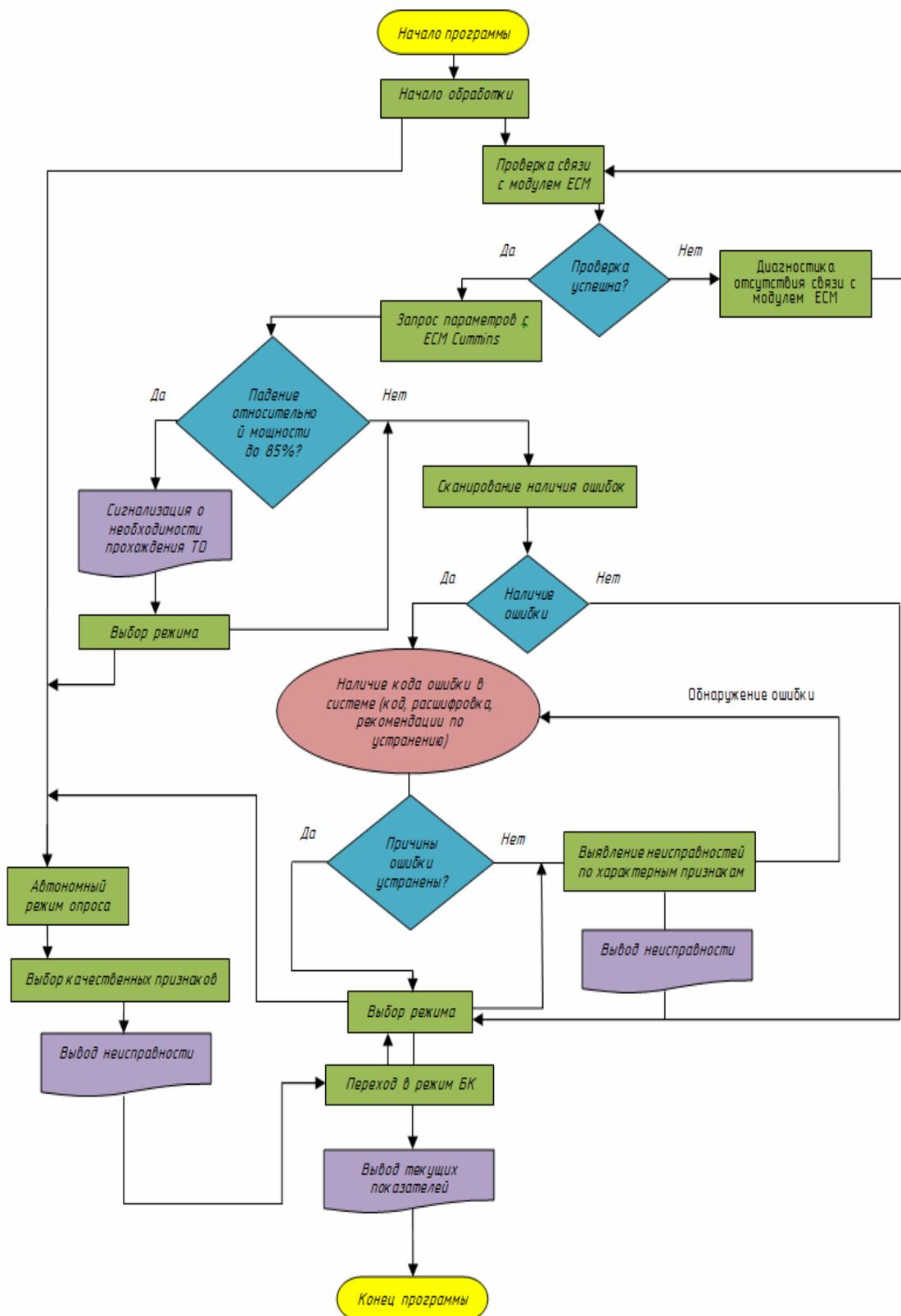


Рис. 5.6. Алгоритм работы встроенной системы диагностирования дизельного двигателя

В режиме отображения кодов неисправностей БК в цикле считывает из блока управления коды неисправностей и отображает на дисплее их число. Если кодов неисправностей нет, то доступна только кнопка «Меню» (рис. 5.7), при нажатии на которую происходит выход из режима отображения кодов неисправностей. Если коды неисправностей есть, то для их просмотра необходимо нажать кнопки «Ввод», «Влево <» или «Вправо >», «Вверх Δ» или «Вниз ∇». Прокликивание считанных кодов неисправностей осуществляется кнопками «Влево <» и «Вправо >», «Вверх Δ» или «Вниз ∇». Для выхода из режима отображения кодов неисправностей без их очистки необходимо нажать кнопку «Меню». Для стирания кодов неисправностей необходимо нажать кнопку «Меню» и удерживать ее не менее 1,5 секунд. В этом случае «БК» сотрет коды неисправностей в ЭБУ и вновь считывает их (после стирания должно быть считано 0 неисправностей). Коды неисправностей отображаются по стандарту SAE J2012.

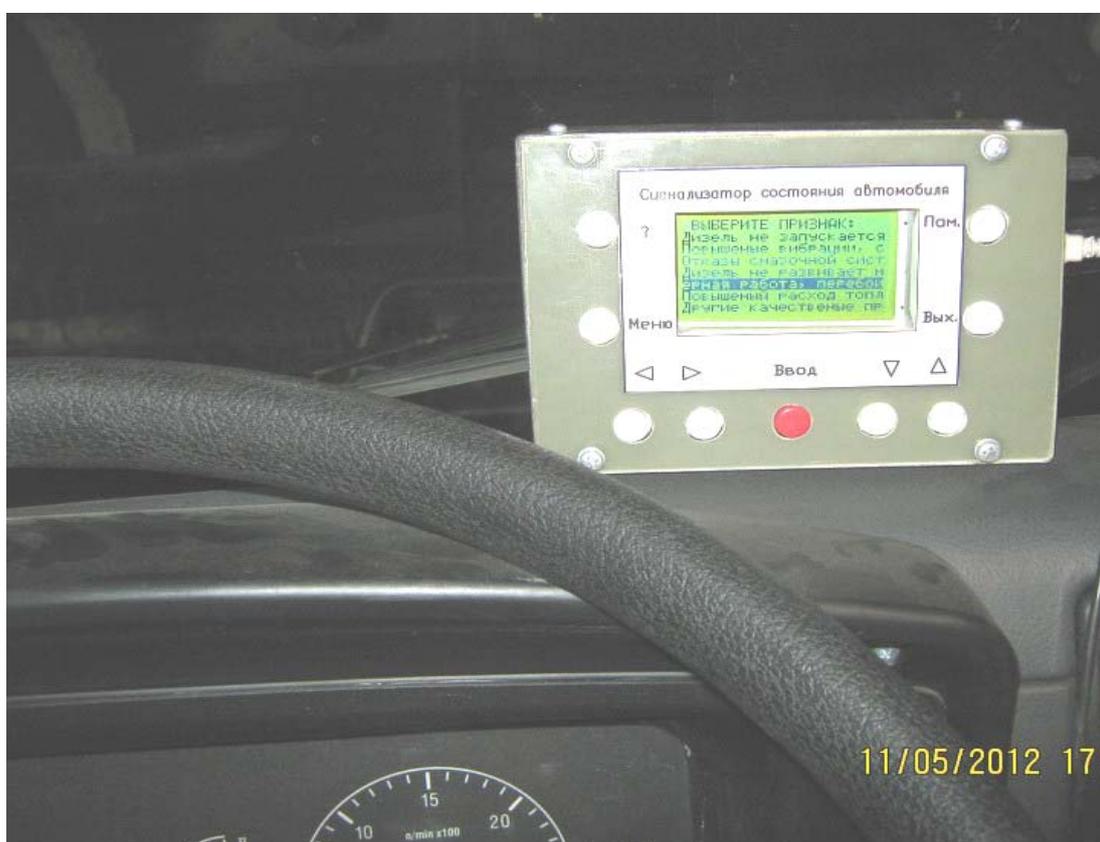


Рис. 5.7. Встроенная система диагностирования автомобиля

Прокликивание исполнительных механизмов осуществляется кнопками «Влево» и «Вправо». При этом для каждого механизма отображается его текущее состояние. Для перехода к управлению текущим исполнительным механизмом необходимо нажать кнопку «Ввод». После этого возможно изменить состояние исполнительного механизма однократным нажатием или нажатием и удержанием кнопок «Влево <» и «Вправо >»,

«Вверх Δ » или «Вниз ∇ ». Изменение состояния исполнительного механизма индицируется символом '*' в первой позиции дисплея. Для возврата управления исполнительным механизмом ЭБУ необходимо вновь нажать кнопку «Ввод».

Для перехода в режим выдачи информации о БК необходимо выключить зажигание, нажать кнопку «Меню» и включить зажигание (удерживая ее нажатой).

В этом режиме можно просмотреть информацию о версии прибора и его авторах. С точки зрения построения программы, учитывая большой объем текстовых сообщений, все их желательно вынести за пределы внутреннего сравнительно небольшого постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) микроконтроллера. Так как между обновлениями информации существует большая пауза (не менее 100 мс), а количество одновременно отображаемых символов невелико, то эти данные могут быть размещены во внешнем ПЗУ с последовательной выборкой и извлекаться оттуда по мере необходимости. Развивая эту идею, можно вынести во внешнее ПЗУ сами запросы, описание формул для пересчета различных параметров, весь сценарий работы с меню, а также режим опроса, который существенно повышает функциональные возможности прибора, позволяет выявить абсолютное большинство возможных неисправностей автомобиля.

Из режима БК или при запуске системы выбирается режим автономного опроса (см. рис. 5.7) к поиску неисправностей путём опроса водителя автомобиля, который выбирает из предложенных вариантов неправильной работы двигателя или автомобиля наиболее характерные признаки, которые он заметил на своём автомобиле. Последовательность опроса диагноста по этим вопросам зависит от частоты появления признаков и составляется на основании статистических данных, собранных в условиях эксплуатации. На основании полученной информации определяются вероятные гипотезы – элементы двигателя, подозреваемые на отказ.

По завершении этапа выбора качественных признаков в системе происходит просмотр базы данных и формирование рабочего набора предполагаемых неисправностей, обеспечивающих решение задачи поиска неисправностей.

После определения качественного признака следует определить причину неисправности. Система в диалоге проводит опрос пользователя о том, какая наработка двигателя, какие ремонтно-обслуживающие работы проводились в последнее время, как он заметил появление качественного признака, какие работы выполнял, какие ещё сопутствующие качественные признаки проявляются при этом. На этом этапе поиска определяющим при последовательности задания вопросов является логическая целесообразность того или иного вопроса. На этом этапе взаимодействие пользователя с системой происходит посредством последовательного предъявления

пользователю вопросов системы и выбором им вариантов ответа в меню различных типов.

По результатам опроса уточняются вероятности рассматриваемых гипотез. В ряде случаев, основываясь только на результатах ответов на опросные вопросы, можно принять диагностическое решение.

Далее система предлагает диагностику в оптимальной последовательности провести диагностические проверки по качественным признакам и с использованием инструментальных средств диагностирования. Номенклатура диагностических средств, применяемых при поиске, легко изменяется в соответствии с имеющимися у пользователя.

После обнаружения неисправности система предлагает пользователю решить вопрос о продолжении поиска. Если обнаруженная неисправность оказалась ошибочной или после восстановления неисправности работа двигателя не нормализовалась, рекомендуется продолжить поиск.

Предлагаемая встроенная система диагностирования предназначена для использования водителем автомобиля или механиком автотранспортного предприятия и выдачи данных на БК или ЭВМ о работе и техническом состоянии автомобилей. Обеспечивается практически непрерывным контролем всех ответственных узлов по функциональным параметрам и обобщенным показателям работоспособности важнейших агрегатов. Позволяет выявлять предотказные состояния узлов, определяющих наибольшую частоту обращений в ремонтную зону автотранспортного предприятия или на станцию технического обслуживания, а также снижение функциональных качеств, представляющих угрозу для безопасности движения. В частности контроль топливной экономичности, состояние аккумуляторной батареи, неравномерность действия тормозов и др.

Значительная доля парка эксплуатируется без диагностирования, нередко в отрыве от автотранспортного предприятия и станций технического обслуживания, в мелких ведомственных и личных плохо оснащенных гаражах, поэтому микропроцессорным встроенным средствам отводится задача контроля технического состояния агрегатов, узлов, систем и автомобиля в целом. В результате формируются рекомендации по продолжению работ автомобиля на линии либо постановки его на техническое обслуживание и текущий ремонт или выполнение мелкого ремонта самим водителем в пределах ежедневного обслуживания.

Для оперативного ежедневного контроля над состоянием подвижного состава автотранспортного предприятия предлагается внедрить диагностический прибор, работа которого основана на фиксации и анализе показателей автомобиля при использовании диагностирования.

Программа прибора включает блоки формирования баз данных по результатам диагностирования и сведениям работе двигателя со слов водителя. Подготовленные данные обрабатываются с помощью расчётно-анали-

зирующего блока. С помощью блока индикации результаты расчета и анализа выводятся на экран прибора, расположенного в кабине автомобиля. Данная информация является основанием для своевременного принятия решений по проведению технического обслуживания двигателя автомобиля.

Первая часть программы – аналитическая, определяет наличие и вид неисправностей в топливной системе дизеля (ТНВД и форсунки), вторая часть – опросная, рассчитана на остальные системы двигателя.

Алгоритм программы выглядит следующим образом (рис. 5.8).

При запуске программа начинает работу с проверки наличия контакта с датчиком давления. Если контакт не установлен, то на экран прибора в кабине водителя выводится надпись «Ошибка! Датчик недоступен». В этом случае программа прекращает свою работу.

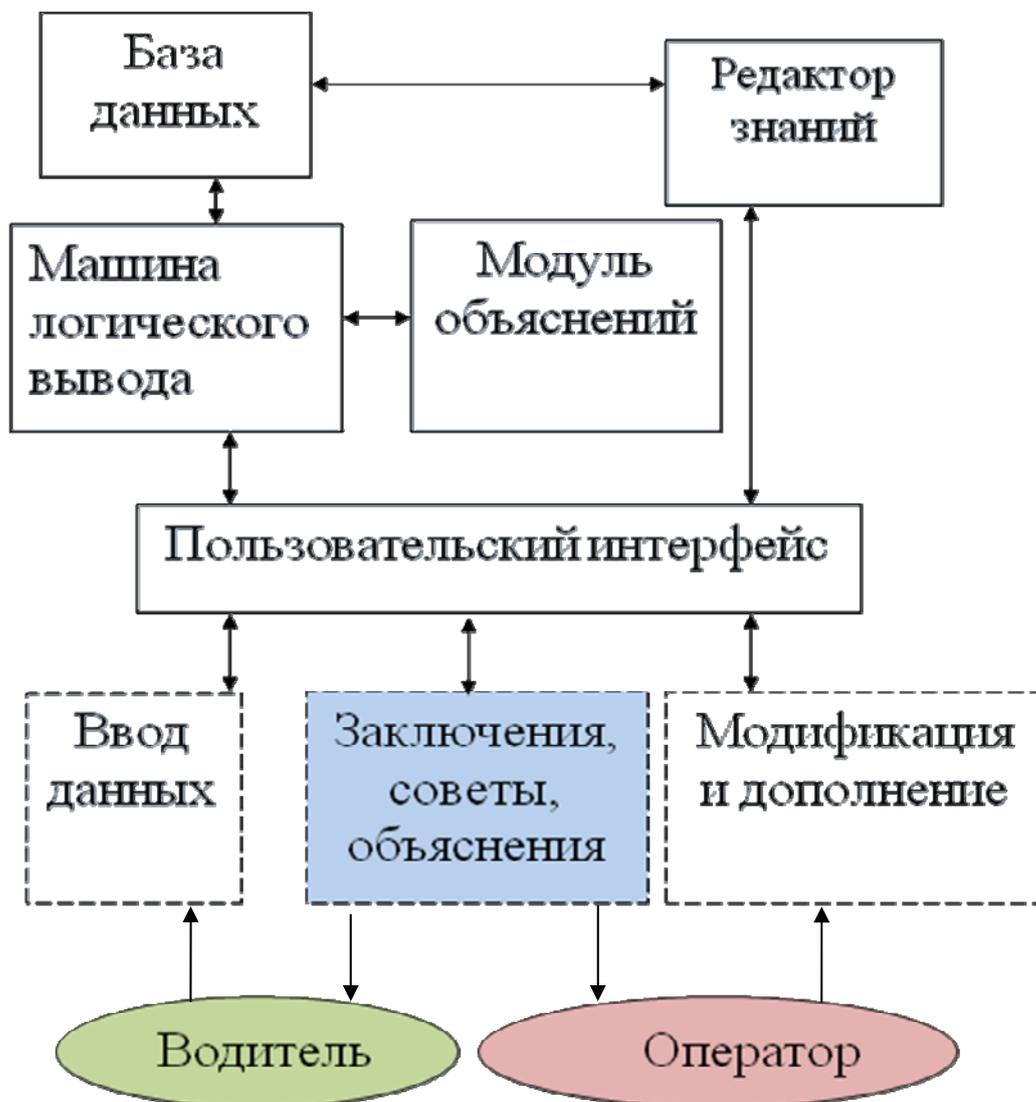


Рис. 5.8. Логическая схема программы

Если контакт с датчиком установлен, то в программу водителем вводятся начальные данные. Затем программа по показаниям датчика строит график и при наличии неисправностей выводит их на экран в текстовом режиме. Далее система переходит к опросной части. Водителю предлагается выбор – закончить программу сейчас или продолжить поиск неисправностей в других системах двигателя. При продолжении программа использует метод «логический поиск с последовательным исключением». Водителю надлежит выбрать качественные признаки неправильной работы двигателя. Затем в конце процесса на экран выводится неисправность.

Программа считывает значения с накладного датчика давления топлива, установленного на топливопровод высокого давления.

Считанные значения автоматически записываются в базу данных программы, затем, на основании этих данных, строятся графики давления топлива. По давлению топлива в контрольных точках определяется наличие неисправности и её вид.

Изменение давления анализируется следующим образом (рис. 5.9).

Здесь в точке 1 начинается повышение давления в результате движения плунжера насоса, в точке 2 срабатывает нагнетательный клапан, и при малой скорости движения плунжера рост давления на некоторое время замедляется. В точке 3 поднимается игла форсунки. При этом давление падает, поскольку высвободившийся объем не успевает заполниться топливом, а затем снова повышается до определённой величины.

Точка 4 на большой частоте вращения коленчатого вала двигателя может характеризовать максимальное давление процесса впрыска. Однако для нормального процесса в режиме холостого хода это давление обычно фиксируется по характерному пику точки 3. В точке 5 происходит «посадка» иглы форсунки и впрыскивание заканчивается, после чего происходит «посадка» в седло нагнетательного клапана плунжера. Импульсы остаточного давления (6) появляются в результате недостаточной герметичности нагнетательного клапана. Величина сигнала S_1 определяет затяжку пружины форсунки и статическое давление начала впрыска. Перепад давления ΔP характеризует подвижность иглы форсунки. Путем интегрирования на периоде впрыска $t_{впр}$ можно оценить цикловую подачу топлива. Время задержки впрыска S_2 характеризует зазор в плунжерной паре, вызывающий утечку топлива между гильзой и плунжером.

При разработке программы учитывались данные по давлению топлива с двух типов дизельных двигателей – ЯМЗ и КАМАЗ. Показания давления снимались с двигателей на двух режимах работы – холостой ход и нагрузочный режим. Графики с показателями нормальной работы дизелей ЯМЗ показаны на рис. 5.11 и 5.12.

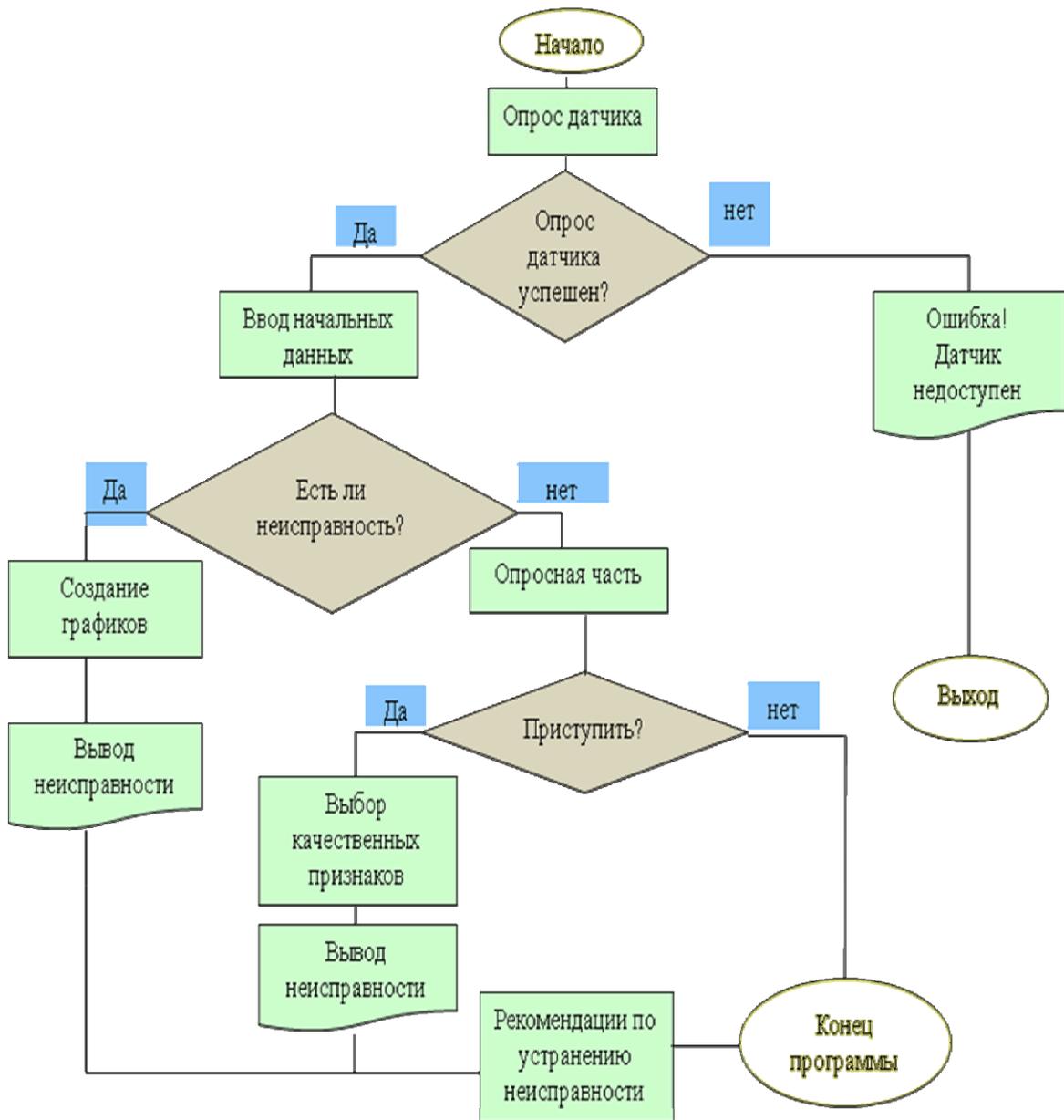


Рис. 5.9. Алгоритм работы системы диагностирования

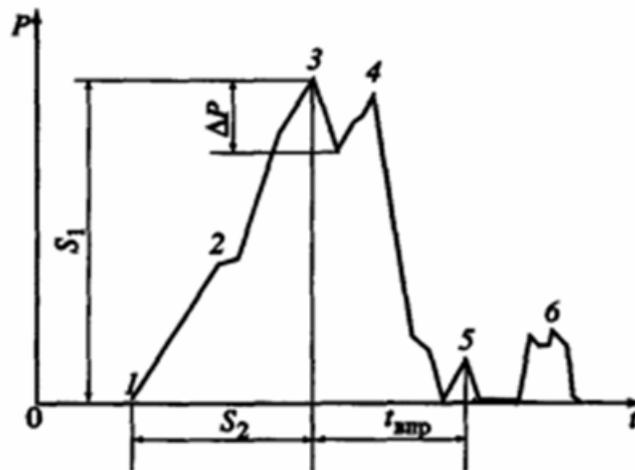


Рис. 5.10. Характерные точки на графике давления топлива



Рис. 5.11. График давления при нормальной работе ЯМЗ (холостой ход)

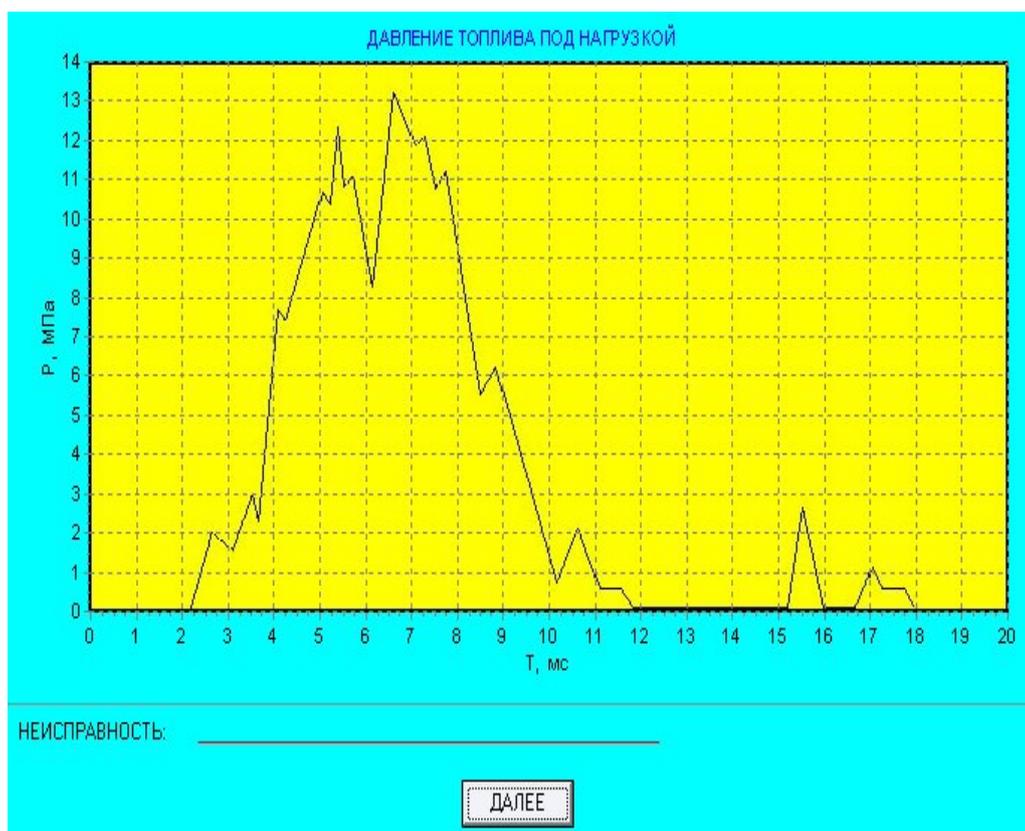


Рис. 5.12. График давления при нормальной работе ЯМЗ (под нагрузкой)

В данном проекте разрабатывалась программа для двигателей КАМАЗ. В этой программе представлены характерные неисправности ТНВД и форсунок на холостом ходу и под нагрузкой.

Затем осуществляется переход непосредственно к диагностированию топливной системы двигателя на холостых оборотах. Для наглядности

наличия неисправности на графиках изначально присутствуют графики нормальной работы элементов топливной системы дизеля (рис. 5.13).

Следующий этап – диагностика дизеля под нагрузкой (рис. 5.14). Здесь также для наглядности наличия неисправности на графиках изначально присутствуют графики нормальной работы элементов топливной системы дизеля под нагрузкой.

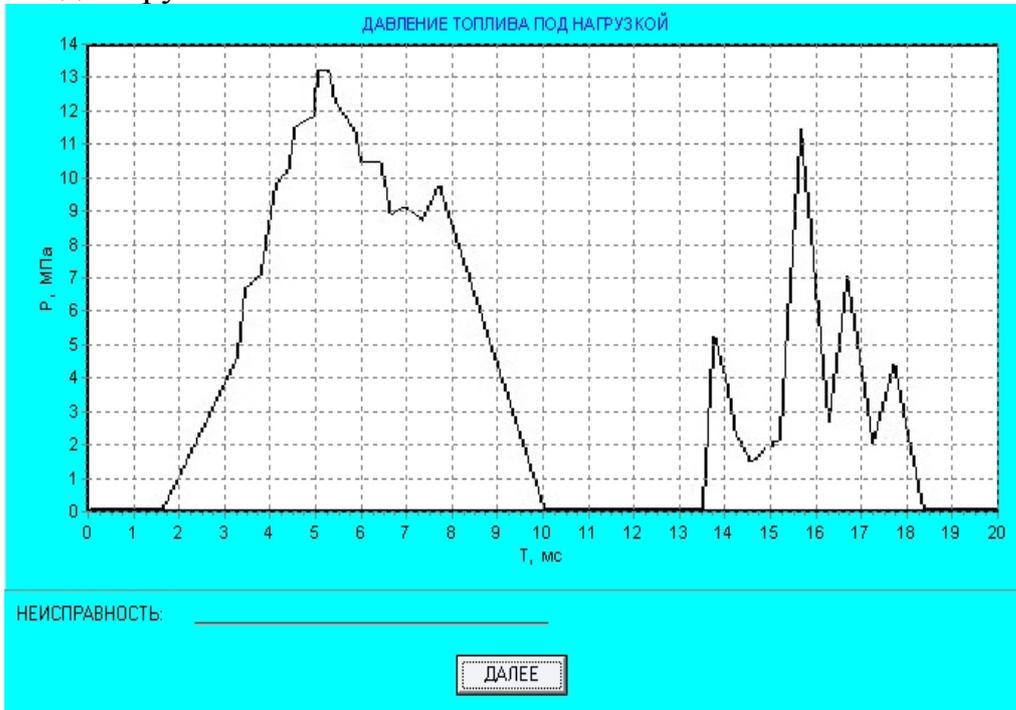


Рис. 5.13. Диагностика топливной системы на холостом ходу

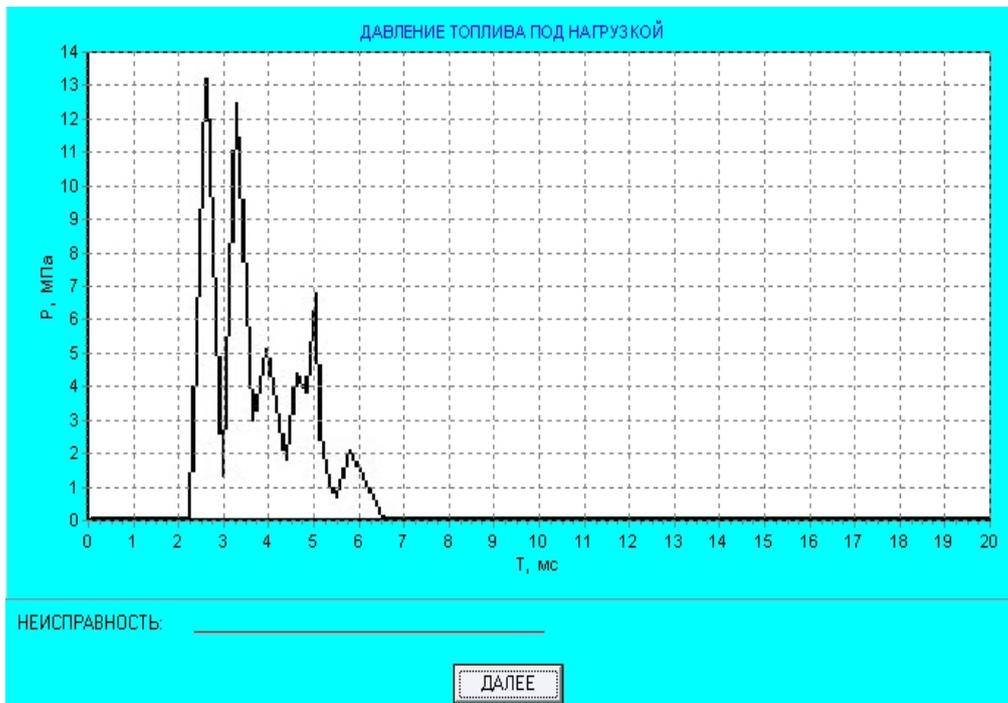


Рис. 5.14. Диагностика топливной системы под нагрузкой

Под графиками в случае выявления неисправности появляется надпись, характеризующая эту неисправность, например, «нарушение подвижности иглы распылителя». Если неисправностей не выявлено, появится надпись «неисправностей не обнаружено». На рис. 5.15–5.26 представлен вид рабочего окна программы при наличии в топливной системе двигателя наиболее характерных неисправностей.

Неисправности холостого хода

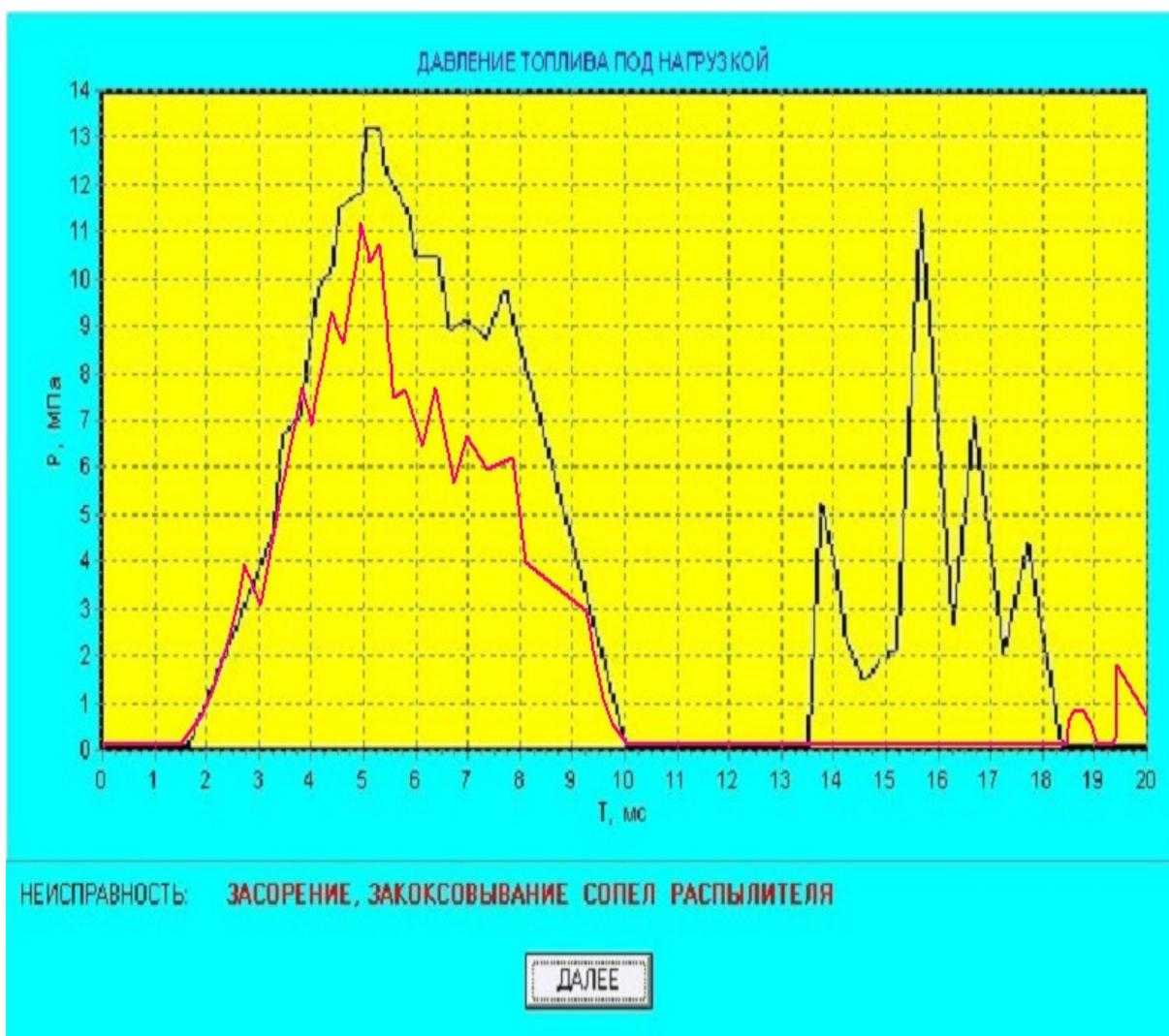


Рис. 5.15. Засорение, закоксовывание сопел распылителя форсунки

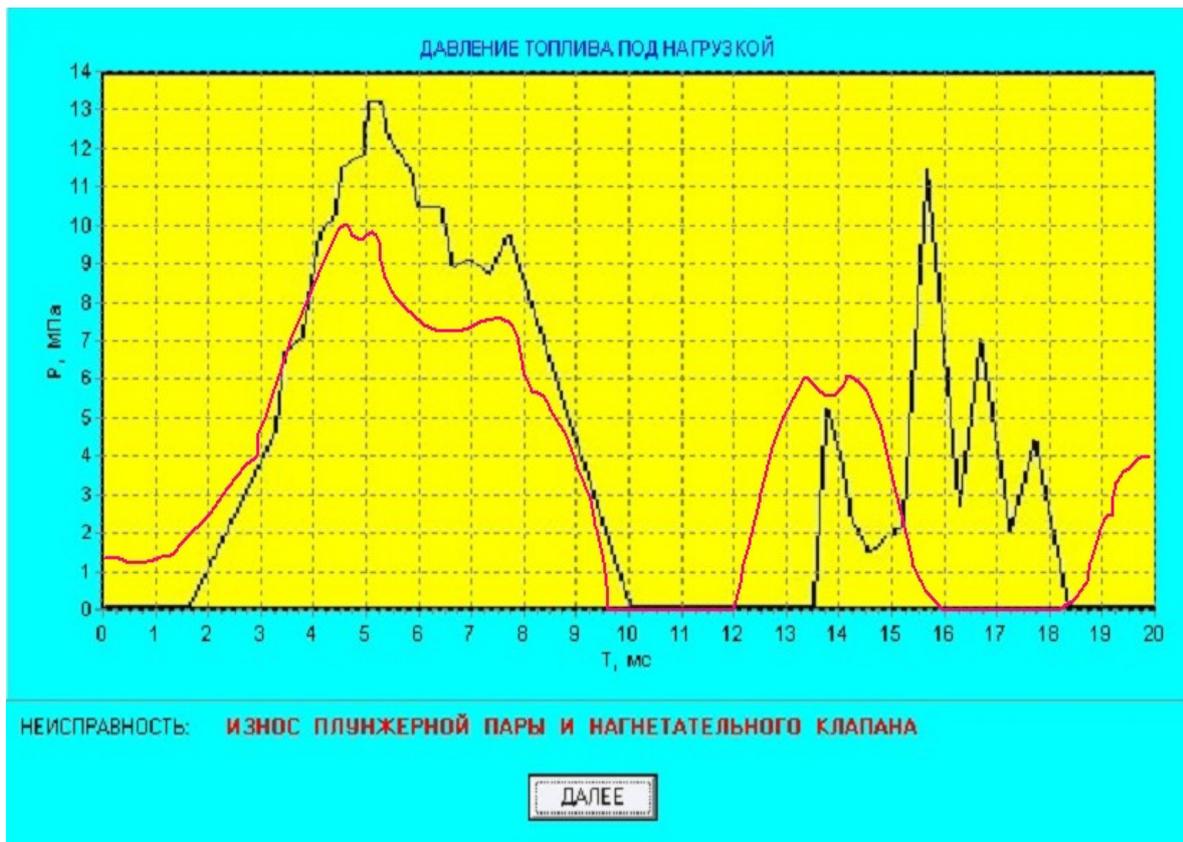


Рис. 5.16. Износ плунжерной пары и нагнетательного клапана

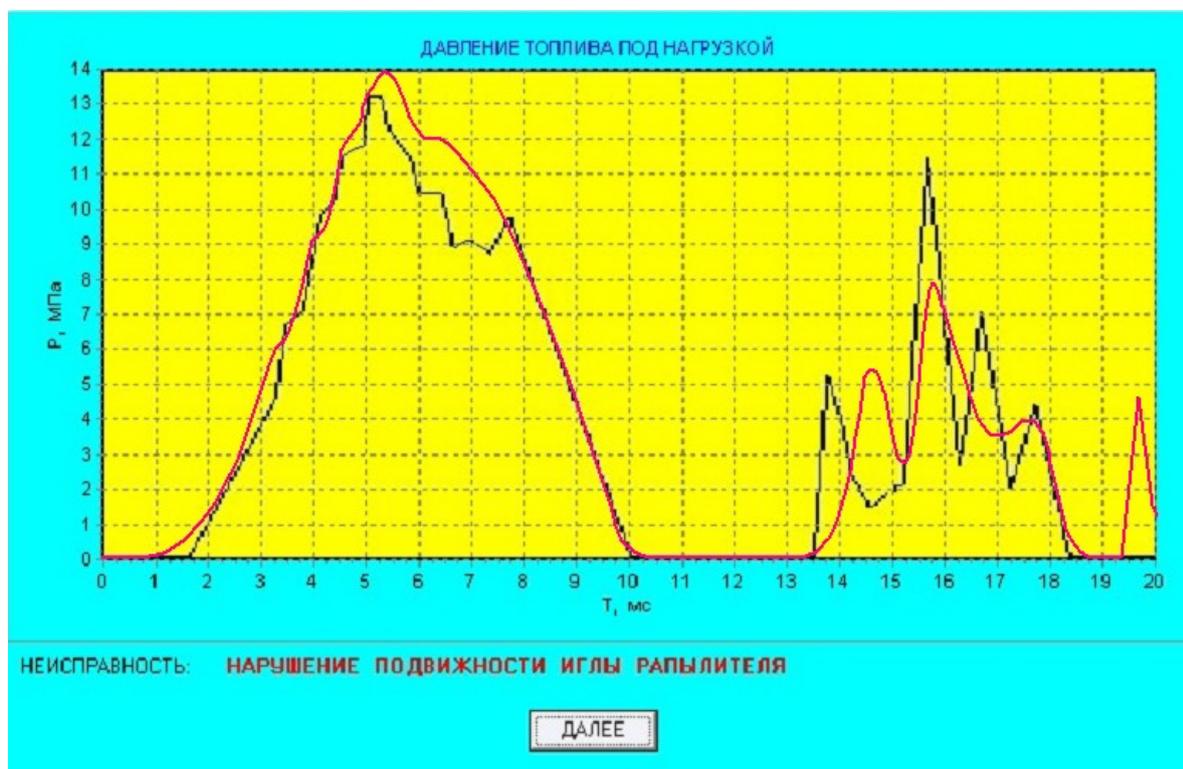


Рис. 5.17. Нарушение подвижности иглы распылителя

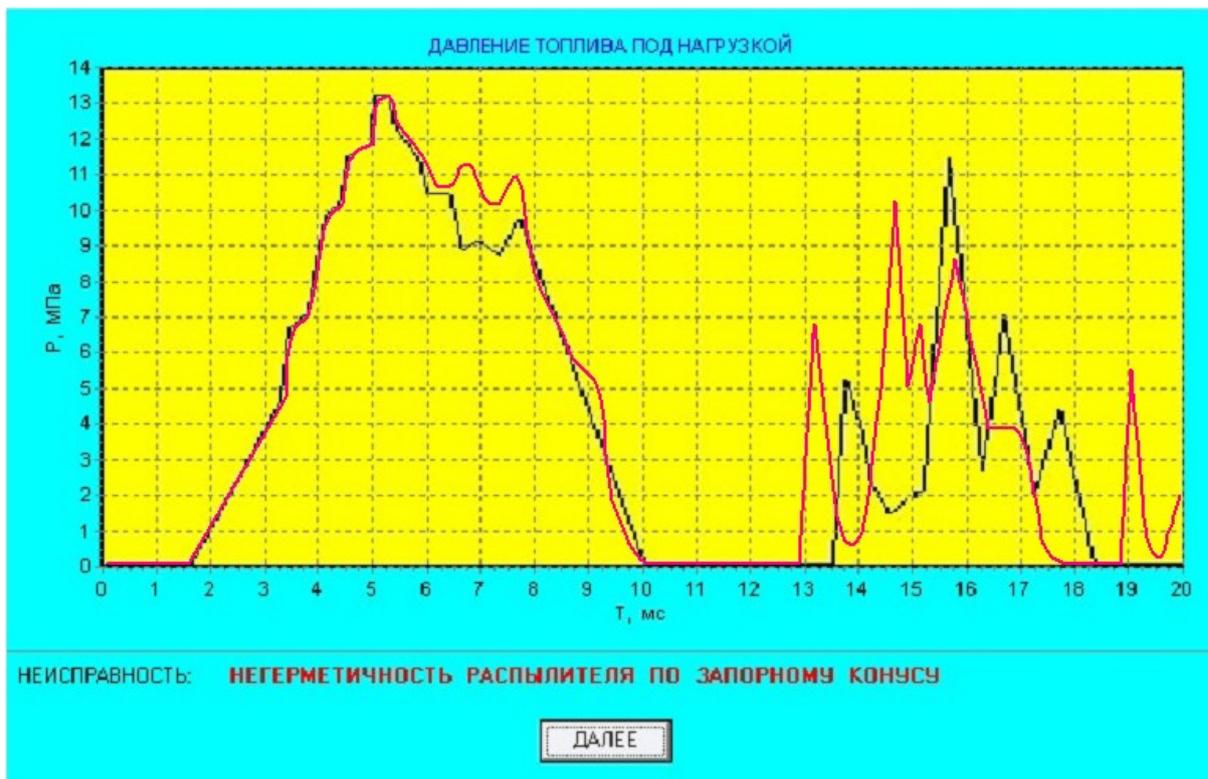


Рис. 5.18. Негерметичность распылителя по запорному контуру

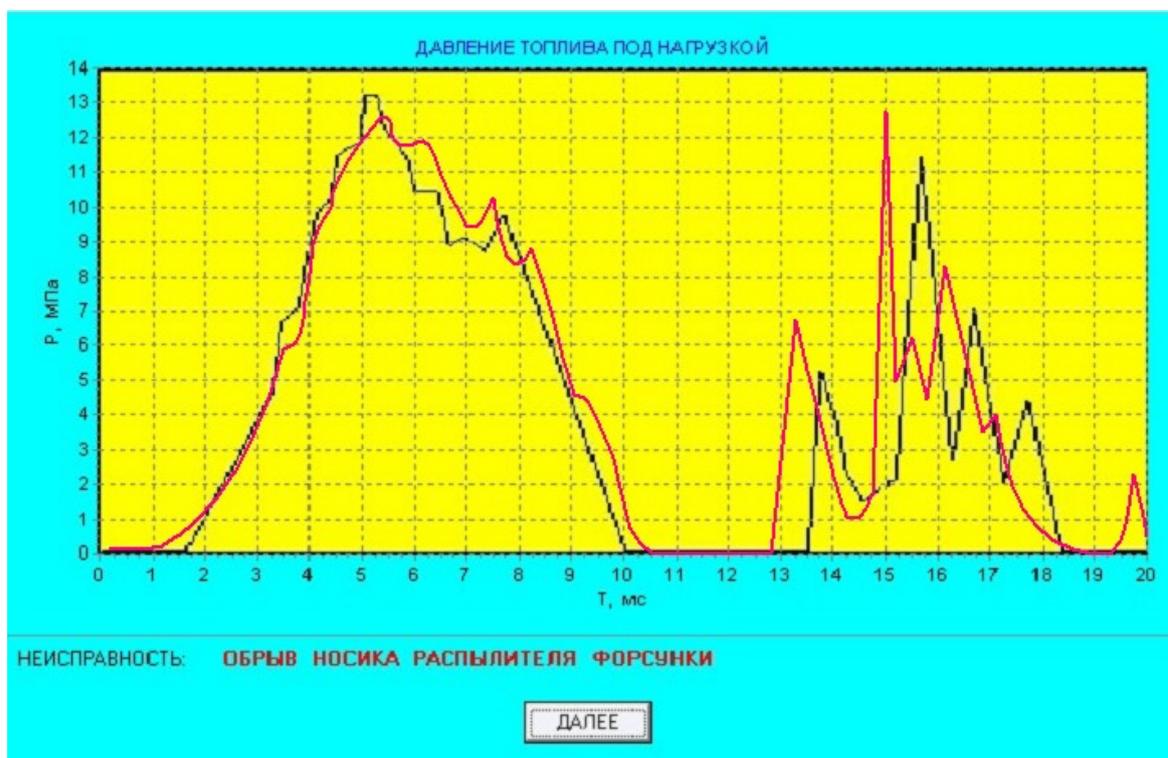


Рис. 5.19. Обрыв носика распылителя форсунки

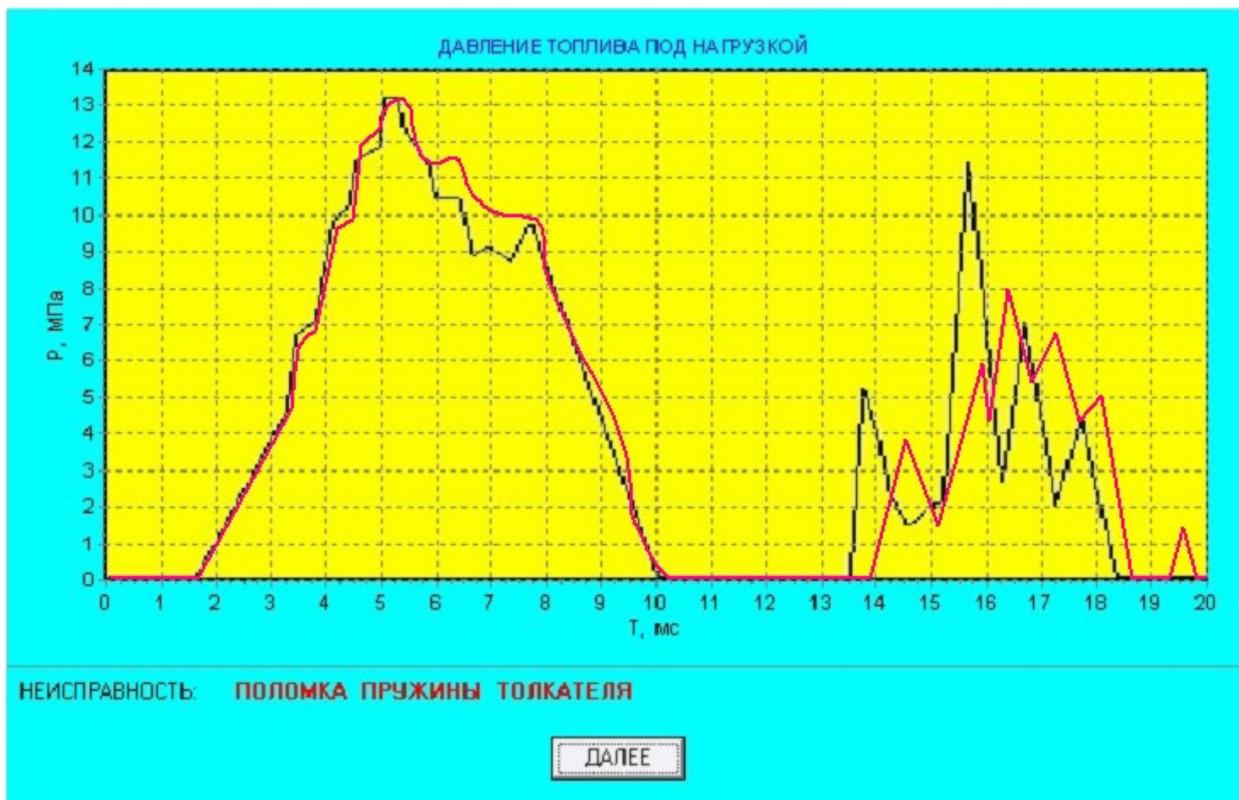


Рис. 5.20. Поломка пружины толкателя

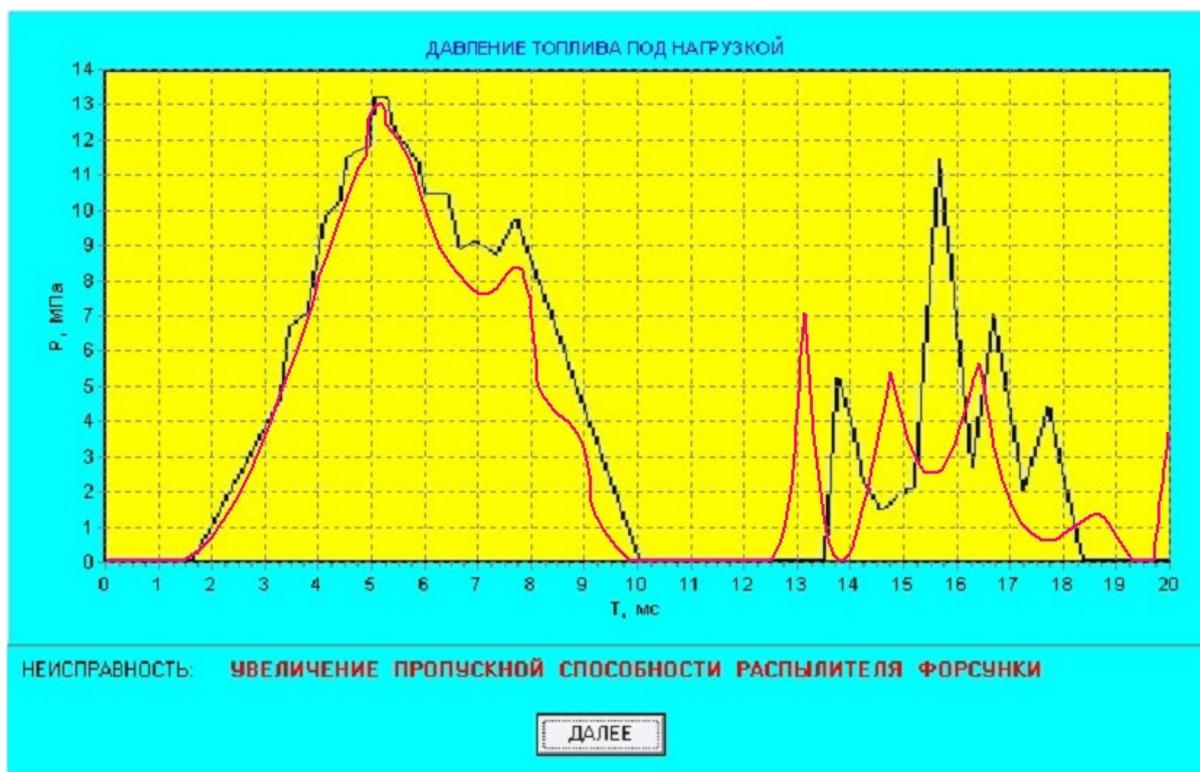


Рис. 5.21. Увеличение пропускной способности распылителя

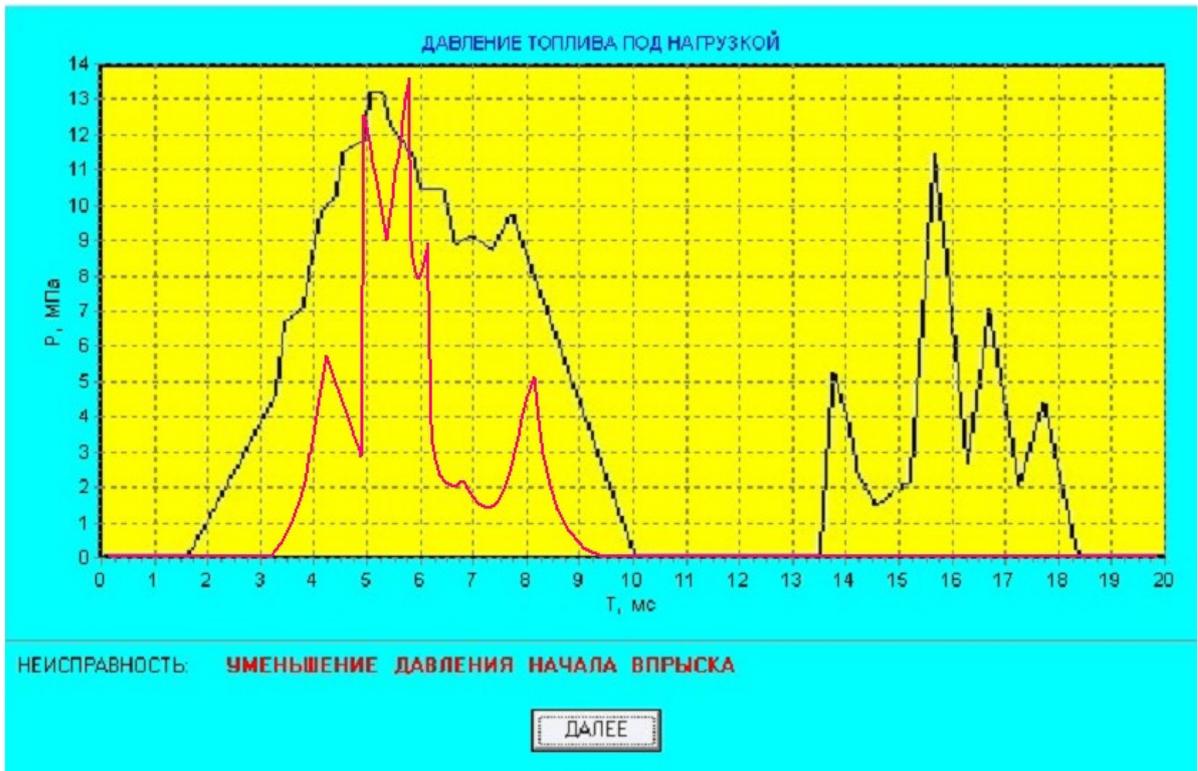


Рис. 5.22. Уменьшение давления начала впрыска

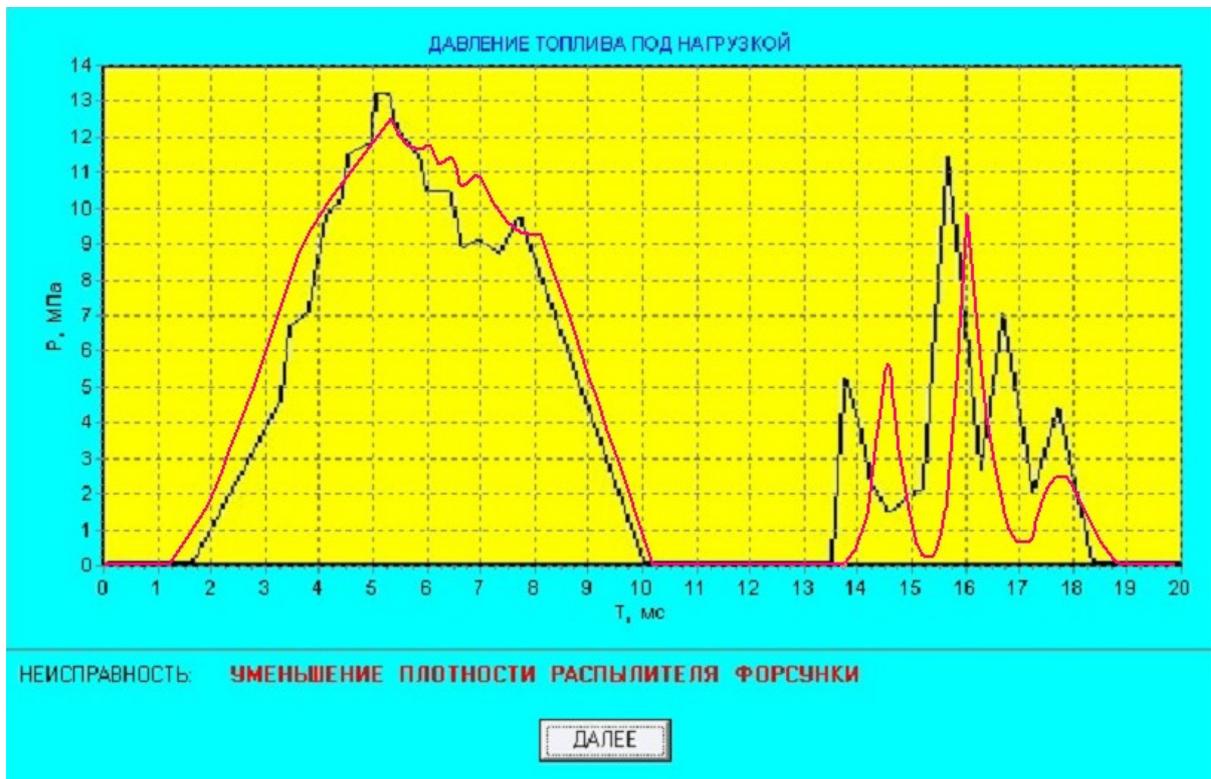


Рис. 5.23. Уменьшение плотности распылителя форсунки

Неисправности нагрузочного режима

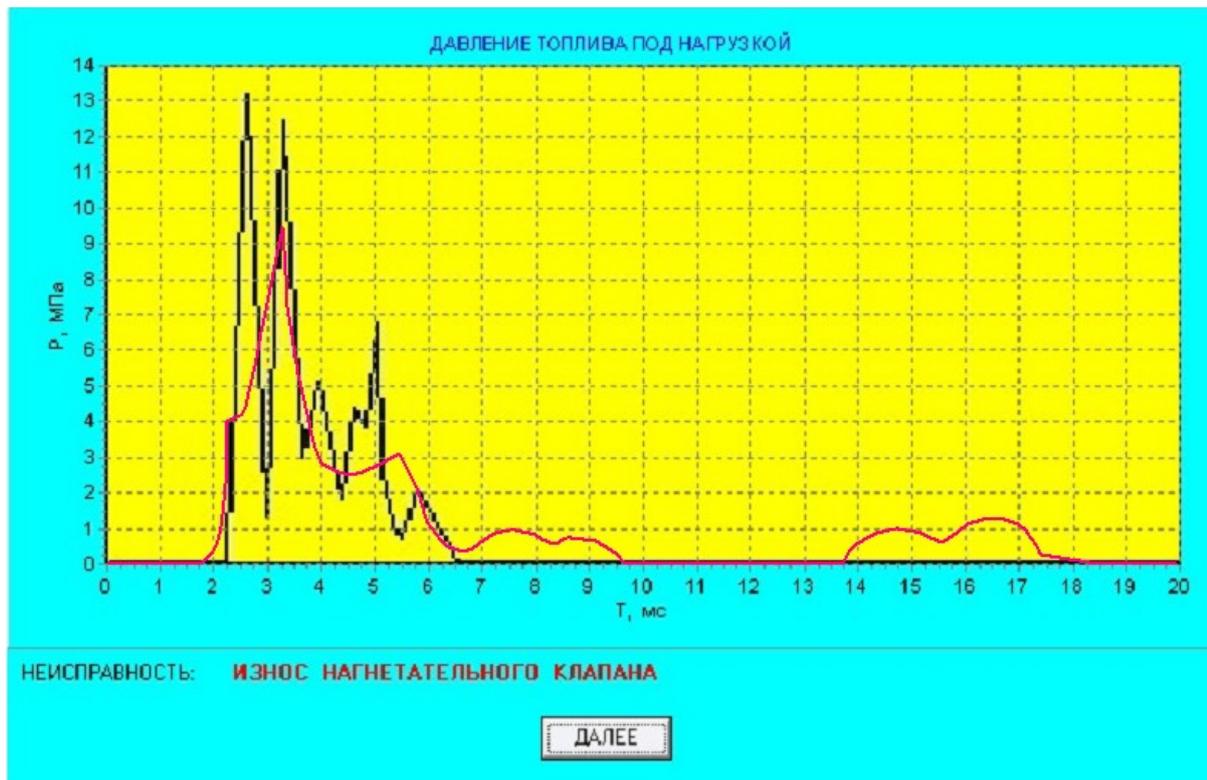


Рис. 5.24. Износ нагнетательного клапана

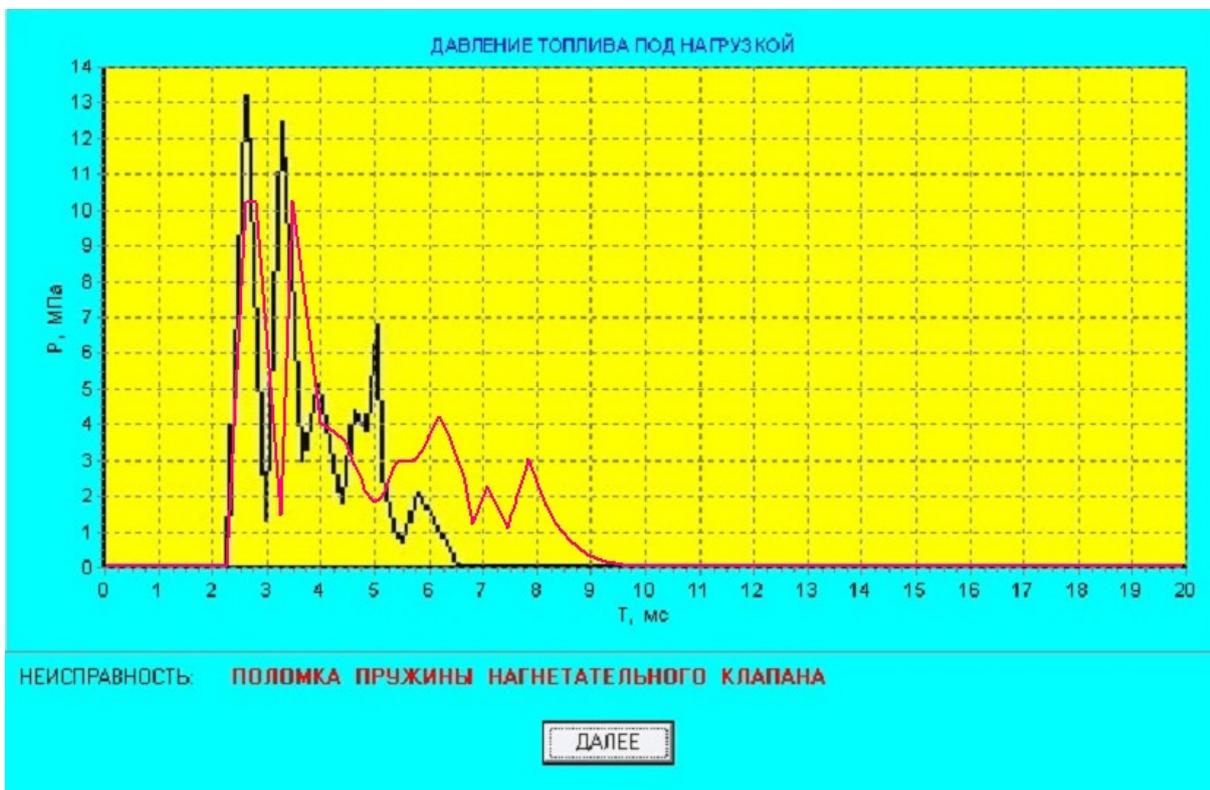


Рис. 5.25. Поломка пружины нагнетательного клапана

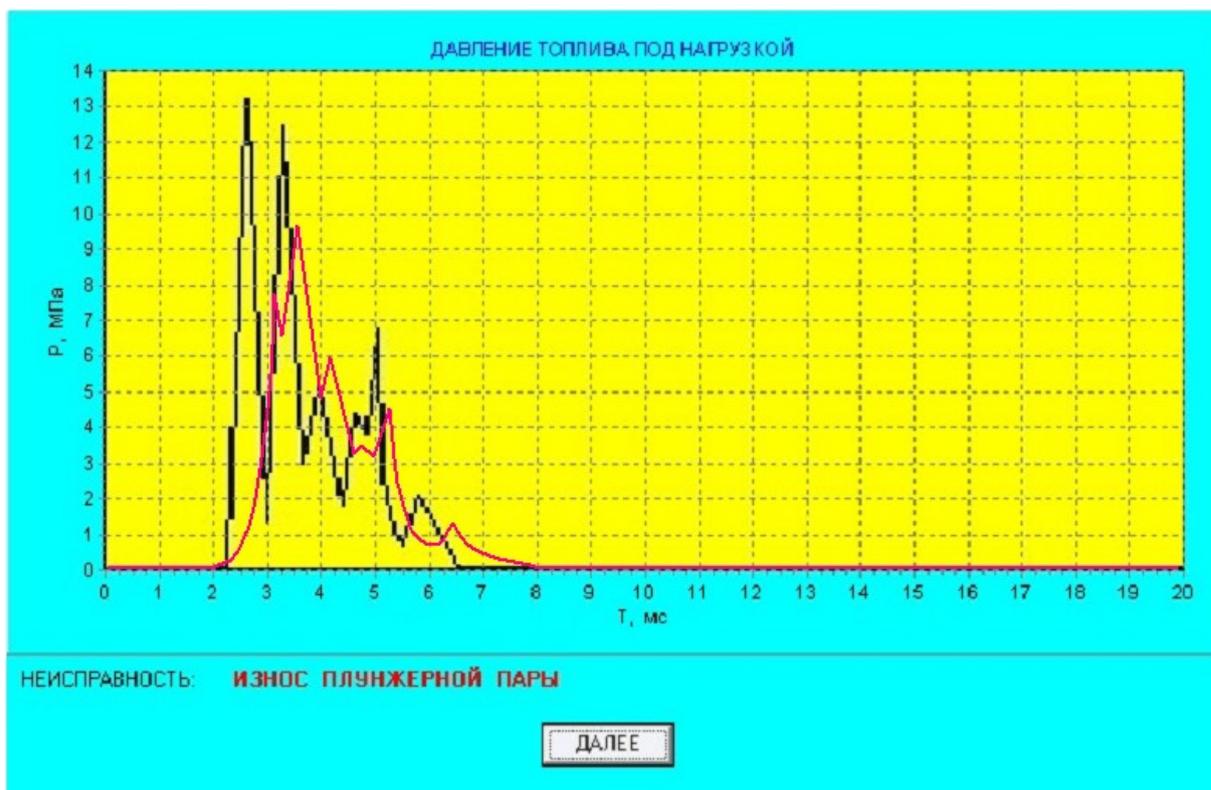


Рис. 5.26. Износ плунжерной пары

Вывод на дисплей прибора двух кривых – базовой и рабочей, при совпадении кривых диагностируемый элемент двигателя считается исправным, в противном случае – неисправным. Кроме того при отклонении давления топлива до предельного значения выводится надпись о неисправности. Такой способ эффективен и информативен. Это приводит к снижению затрат времени на диагностирование.

При разработке программы учитывались данные по давлению топлива с дизельных двигателей – КАМАЗ. Показания давления снимались с двигателей на двух режимах работы – холостой ход и нагрузочный режим.

Необходима предварительная подготовка, которая должна проходить в условиях приближенных к производственным, т.е. на экране компьютера должно воспроизводиться возможное изменение давления в топливной системе соответствующее заданной неисправности, а диагност должен правильно его идентифицировать.

С этой целью предлагается ввести модуль воспроизводящий осциллограммы давления при различных неисправностях элементов системы питания на основе чего создается база данных с осциллограммами давления при различных неисправностях топливной системы.

Так как описать осциллограммы аналитическими зависимостями не предоставляется возможным, то при создании базы осциллограмм использован метод оцифровки уже существующих осциллограмм, которая производилась с помощью программы Graph2Digit2. Оцифровка выполнялась по

цвету линии графика (цвет линии – синий), который был предварительно подготовлен (рис. 5.27). Далее были заданы пределы и шаги оцифровки по координатным осям. Поскольку весь процесс изменения давления при впрыске топлива проходил за 20 мс, предел по абсциссе был принят равным 200. Шаг в нашем случае равен 1, что в переводе в мс составило 0,1 мс. Такие параметры позволили наиболее точно оцифровать исходный график и получить базу данных по данной зависимости, которая была трансформирована в файл системы управления базами данных Paradox.

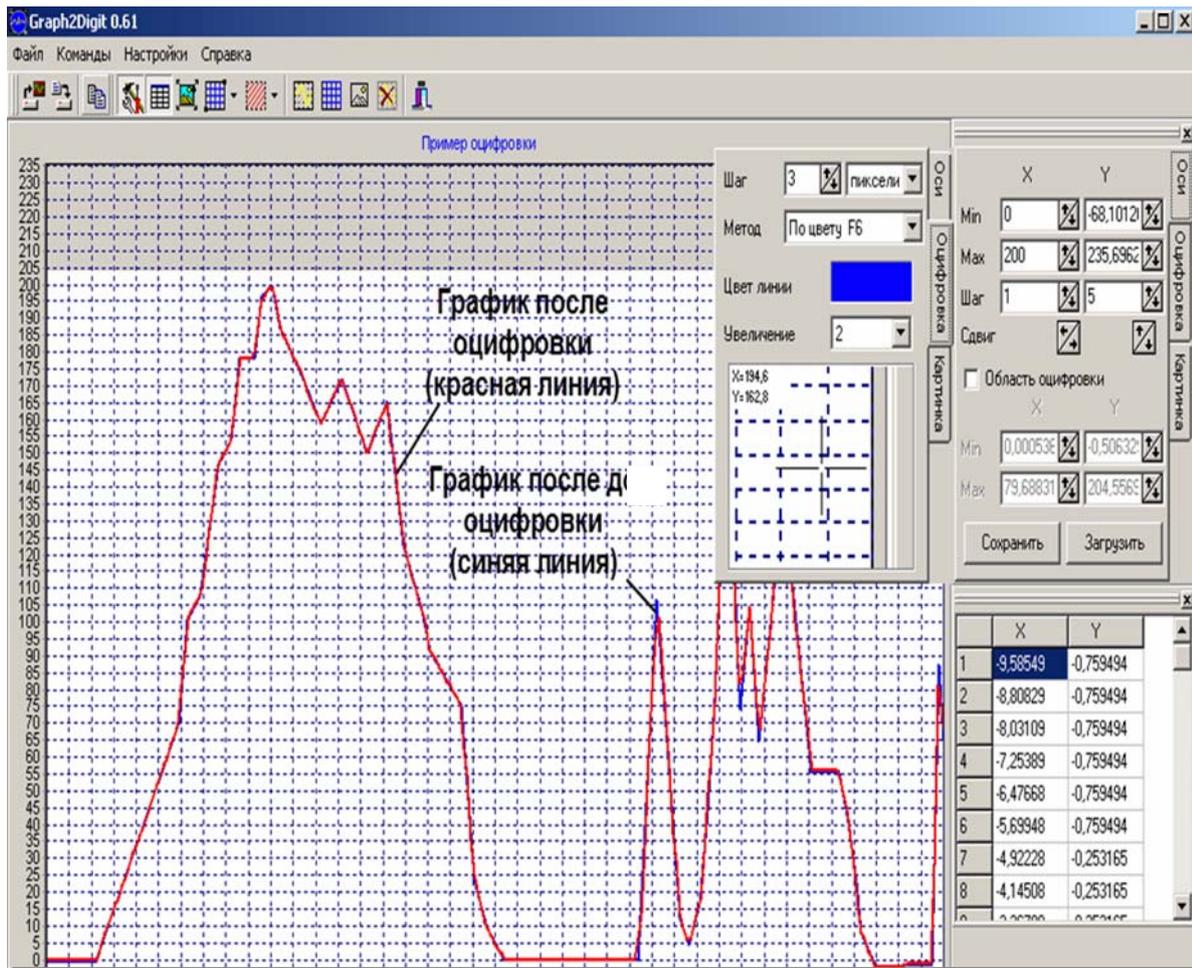


Рис. 5.27. Оцифровка графика давления топлива

Для выхода в режим диагностирования системы питания предлагается запустить двигатель и нажать кнопку F4 «Осциллограмма».

На экране появится осциллограмма синего цвета 1 (рис. 5.28), характеризующая пульсацию давления в топливной системе диагностируемого двигателя и осциллограмма зеленого цвета 2, характеризующая изменение давления топлива при отсутствии неисправностей (контрольная осциллограмма). Сопоставляя эти осциллограммы, программа по допустимому значению может найти совпадающие осциллограммы синего цвета 1 (осциллограмма диагностируемого двигателя) и красного цвета 3 (осцилло-

грамма из базы данных соответствующая известной неисправности), т.е. определить неисправность топливной системы дизеля.



Рис. 5.28. Окно с осциллограммами

Добавив функцию вызова осциллограмм давления топлива с возможными неисправностями во время диагностирования двигателя, можно обеспечить сравнение реальной и базовой осциллограмм. Это позволит упростить процесс выявления отказов.

При запуске программы, оператор выбирает дату проведения диагностирования, наработку дизеля, категорию условий эксплуатации и климатические условия эксплуатации автомобиля

Затем осуществляется переход непосредственно к диагностированию топливной системы двигателя на холостых оборотах. Для наглядности наличия неисправности на графиках изначально присутствуют графики нормальной работы элементов топливной системы дизеля

Затем осуществляется переход к диагностированию топливной системы двигателя на холостых оборотах. Для наглядности наличия неисправности на диаграммах введены графики нормальной работы элементов топливной системы дизельного двигателя.

Следующий этап – диагностирование дизельного двигателя под нагрузкой. Здесь также для наглядности наличия неисправности на графиках присутствуют кривые нормальной работы элементов топливной системы дизельного двигателя под нагрузкой.

Под графиками в случае выявления неисправности появляется надпись, характеризующая эту неисправность, например, «нарушение подвижности иглы распылителя». Если неисправностей не выявлено, появится надпись «неисправностей не обнаружено».

Если неисправностей в топливной системе не выявлено, то система переходит к поиску неисправностей путём опроса водителя автомобиля, который выбирает из предложенных вариантов неправильной работы двигателя наиболее характерные признаки, которые он заметил на своём автомобиле. Опросная система имеет древовидную структуру.

Последовательность опроса по этим вопросам зависит от частоты появления признаков и составляется на основании статистических данных, собранных в условиях эксплуатации. На основании полученной информации на этом этапе определяются вероятные гипотезы – элементы двигателя, подозреваемые на отказ.

По завершении этапа выбора качественных признаков в системе происходит просмотр базы данных и формирование рабочего набора предполагаемых неисправностей, обеспечивающих решение задачи поиска неисправностей.

Для уточнения процесса поиска неисправностей система в диалоговом режиме проводит опрос пользователя о том, какая наработка двигателя, какие ремонтно-обслуживающие работы проводились в последнее время, как были замечены проявления качественного признака, какие работы выполнялись, какие ещё сопутствующие качественные признаки проявляются при этом. Определяющим при последовательности задания вопросов является логическая целесообразность того или иного вопроса. Взаимодействие с системой происходит посредством последовательного предъявления пользователю вопросов (рис. 5.29, 5.30) системы и выбором им вариантов ответа в меню различных типов.

Для перемещения по меню используются «стрелки», выбор позиций осуществляется нажатием клавиши «Space». Переход к следующему меню в древовидной структуре осуществляется нажатием клавиши «ДАЛЕЕ».

По результатам опроса уточняются вероятности рассматриваемых гипотез. В ряде случаев, основываясь только на результатах ответов на опросные вопросы, можно принять диагностическое решение. Диагностическая система обладает знаниями о типичных ситуациях, соответствующих наличию наиболее часто встречающихся неисправностей. В ходе опроса система анализирует полученную информацию и формирует гипотезы о неисправностях и предлагает в оптимальной последовательности провести диагностические проверки по качественным признакам с использованием инструментальных средств диагностирования. Номенклатура диагностических средств, применяемых при поиске, легко изменяется в соответствии с имеющимися у пользователя.

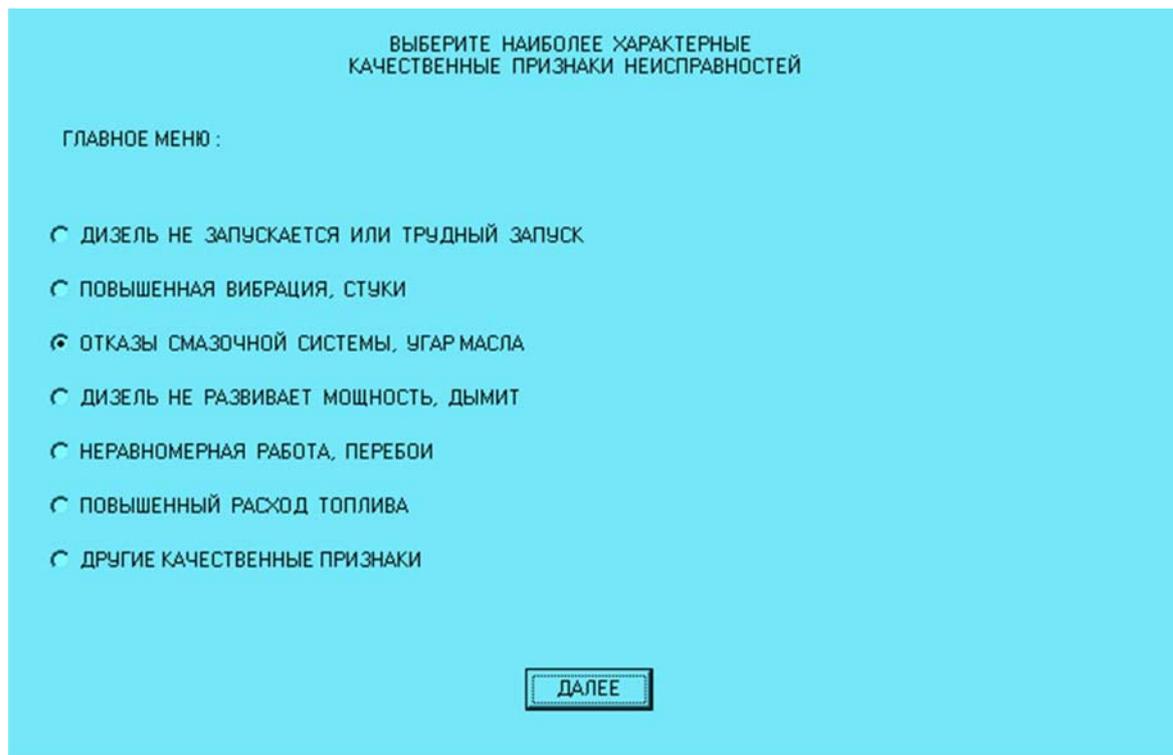


Рис. 5.29. Главное меню

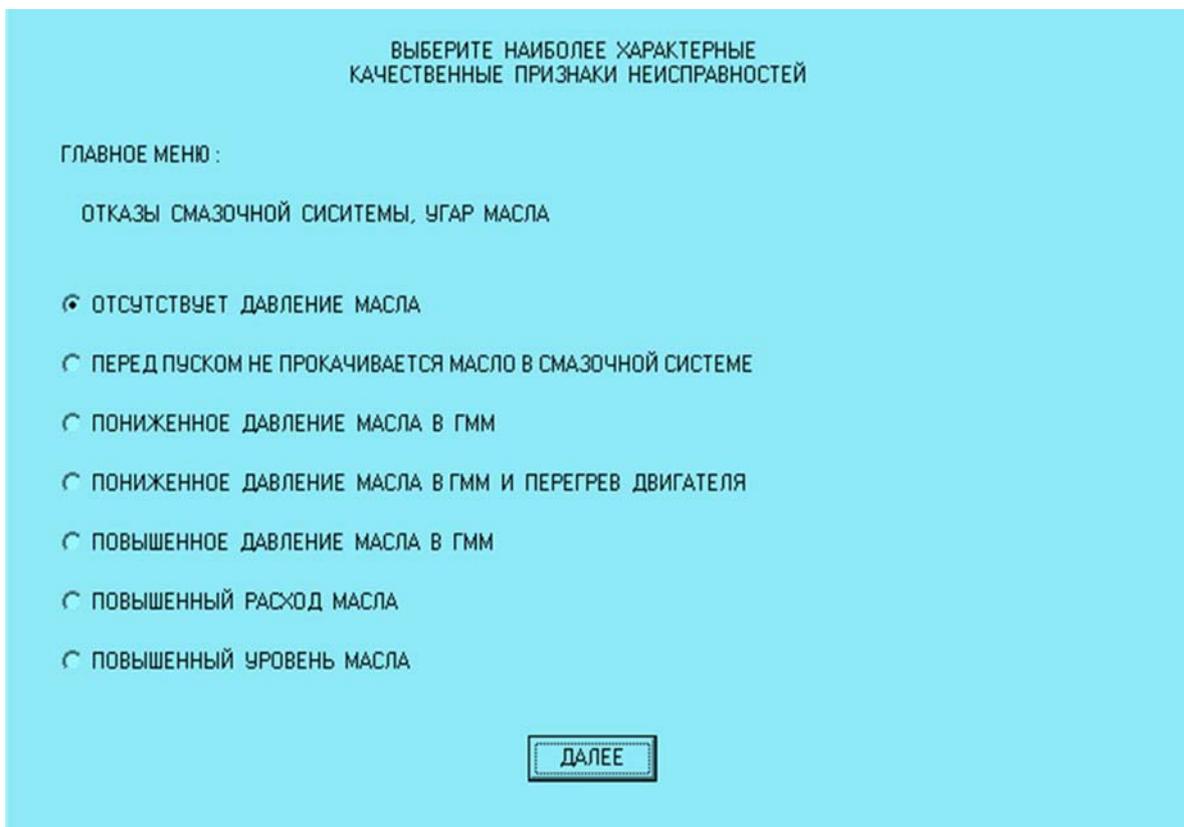


Рис. 5.30. Выбор нужного признака

Взаимодействие с системой происходит посредством последовательного предъявления заданий на проведение диагностических проверок. При этом доступна инструкция о технологии проведения проверки. Работа системы заканчивается определением наиболее вероятной неисправности двигателя.

Разработанное оборудование, программное обеспечение и алгоритмы диагностирования дизеля – составные части системы встроенного диагностирования двигателя, именно системы, поскольку она включает в себя целый комплекс модулей и блоков и производит диагностирование не отдельного узла или системы, а всех основных систем дизеля.

Разработанный макетный образец состоит из трех основных блоков: датчиков; интерфейса; программного обеспечения. Структурная схема такого прибора представлена на рис. 5.31. В таком же исполнении прибор может устанавливаться на автомобиль и являться системой бортовой диагностики транспортного дизеля.

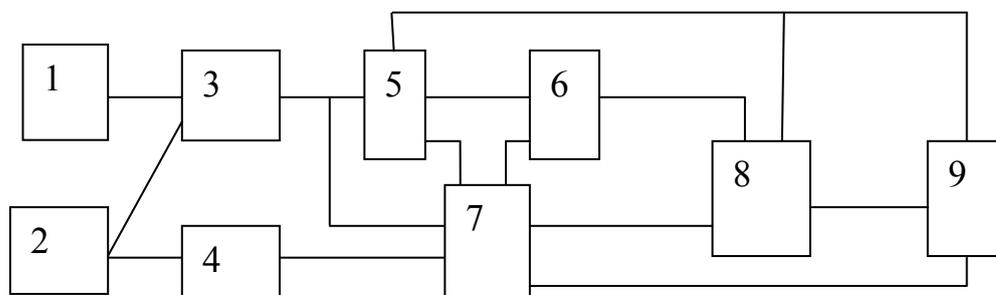


Рисунок 5.30. Устройство для диагностирования дизеля:
 1 – датчик частоты вращения ТРК; 2 – датчик давления топлива;
 3 – формирователь сигнала частоты вращения коленчатого вала и ТРК;
 4 – формирователь сигнала датчика момента впрыска топлива; 5 – блок вычисления угловой скорости; 6 – блок вычисления углового ускорения;
 7 – блок управления; 8 – арифметическое логическое устройство;
 9 – блок индикации

Устройство работает следующим образом. Импульсы от датчиков 1 и 2 пройдя формирователь 3, поступают в блоки 5 и 7. Блок 5 измеряет период следования данных импульсов, и измеренным периодом вычисляет угловую скорость, на данном угле поворота вала, значение которой поступают на входы блоков 6, 7 и 9. Блок 7 учитывая период следования импульсов, измеренную угловую скорость, а так же значение угловой скорости, вычисляет угловое ускорение, значения которой поступают на вход арифметического логического устройства 8.

Сигналы от датчика 2 момента впрыска топлива определенного цилиндра, как правило, первого, через формирователь 4 поступает на вход блока 7 управления. Блок 7, с приходом импульса от датчиков 1, 2 подсчитывает импульсы и рассчитывает угол поворота коленчатого вала и частоту вращения турбокомпрессора. При повороте коленчатого вала на

угол соответствующий моменту впрыска топлива в первом цилиндре двигателя, блок 7 подает первый управляющий сигнал на вход блока 8. По этому сигналу блок 8 начинает выбор минимального значения угловой скорости, приходящегося на начало рабочего хода в первом цилиндре. Одновременно блок 8 осуществляет выбор максимального значения углового ускорения, приходящегося на первую половину рабочего хода в первом цилиндре. При повороте коленчатого вала на угол равный $720/(3*i)$ (где i – число цилиндров двигателя) от верхней мертвой точки конца сжатия, в первом цилиндре блок 8 подает второй управляющий сигнал, с приходом которого блок 9 прекращает выбор минимального значения угловой скорости и максимального значения углового ускорения, заносит эти значения в память и переходит в режим поиска максимального значения угловой скорости, приходящегося на среднюю часть такта расширения. Одновременно блок 8 осуществляет выбор минимального значения углового ускорения, приходящегося на вторую половину такта расширения в первом цилиндре.

При повороте коленчатого вала на угол равный $720/i$ блок 7 подает третий управляющий сигнал, по которому блок 7 прекращает выбор максимального значения угловой скорости и минимального значения углового ускорения, заносит эти значения в память. Одновременно блок 8 начинает поиск минимального значения угловой скорости и максимального значения углового ускорения в следующем по порядку работы цилиндре.

По окончании цикла измерения, который для достижения необходимой точности должен длиться не менее 10 циклов, блок 7 подает очередной управляющий сигнал в блоки 8 и 9. По этому сигналу блок 8 вычисляет среднее значение приращений угловой скорости от минимального значения) до максимального, приходящегося на такт расширения каждого цилиндра, и уменьшение угловой скорости от максимального его значения для i -го цилиндра до минимального его значения, приходящегося на такт расширения в следующем по порядку работы цилиндре, т.е. для $(i+1)$ -го цилиндра, аналогичные показатели определяются и по угловому ускорению. Блок 8 определяет диагностические параметры, сопоставление их с нормативными значениями и ставится диагноз. Результаты индицируются блоком 9 индикации.

Особенности реализации отдельных блоков системы диагностирования дизелей рассматриваются ниже более подробно.

Для диагностирования топливной системы использовался датчик давления.

Для диагностирования топливной системы дизельного двигателя наибольшее распространение получил метод, основанный на анализе изменения давления, фиксируемого при помощи специального датчика, устанавливаемого у форсунки в разрыв нагнетательного топливопровода.

Использование данного метода приводит к необходимости разборки части топливной системы, что является причиной снижения надежности крепления топливопровода. В то же время ухудшение работы топливной системы дизельных двигателей может быть следствием многих причин. Быстро найти действительную причину неудовлетворительной работы топливной системы возможно лишь при соблюдении определенной последовательности в отыскании неисправности и использовании оборудования, позволяющего найти неисправность с наименьшими затратами труда и средств.

В настоящее время в составе стенда КАД-300, КАД-400 выпускается накладной датчик давления К296.04.00 (базовый). Датчик выполняется из двух частей корпуса 1 и 4, подвижных относительно оси 2. В углублениях подвижных частей корпуса расположены пьезоэлементы из поливинил-дефторидной пленки 6. Электрическими выводами датчика являются контакт 3 и топливопровод высокого давления, на который устанавливается датчик (рис. 5.32). Датчик закрепляется на топливопроводе с помощью зажима 5 и рычага 7, применение которого увеличивает надежность крепления на топливопроводе. Однако конструкция крепления датчика не позволяет быстро установить его в условиях ограниченного доступа к топливопроводу высокого давления.

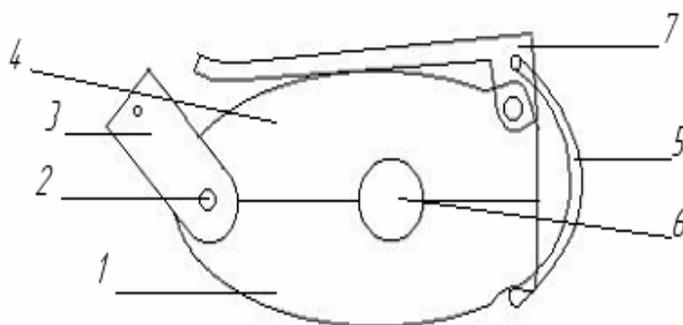


Рис. 5.32. Базовый датчик давления

Для снижения трудоемкости данной операции предлагается изменить конструкцию крепления датчика на эксцентриковый (рис. 5.33). Датчик выполняется из двух частей корпуса 7 и 10, подвижных относительно оси 3. В углублениях подвижных частей корпуса расположены пьезоэлементы из поливинил-дефторидной пленки 9. На корпусе закреплены плечи 1 и 5. Электрическими выводами датчика являются контакт 6 и топливопровод высокого давления, на который устанавливается датчик. Для установки датчика на топливопровод в корпусе имеется отверстие, соответствующее диаметру топливопровода. Датчик закрепляется на топливопроводе с помощью скобы 2, эксцентрика 4 и рычага 8.

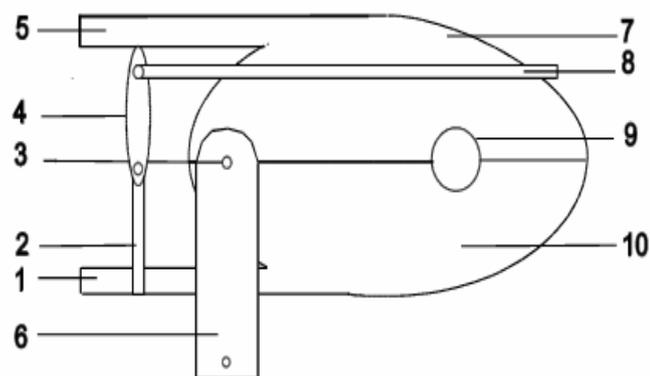


Рис. 5.33. Эксцентриковый

Применение предложенного крепления датчика позволит снизить трудоемкость на установку и снятие предлагаемого датчик, облегчить работу оператора. Тем самым увеличиваем производительность работы оператора.

Более тщательный анализ предложенной конструкции позволяет сделать вывод о необходимости дальнейшего совершенствования крепления датчика на топливопроводе. Наиболее рациональным представляется пружинный зажим (рис. 5.34), который выполняется из двух частей корпуса 6 и 7, подвижных относительно оси 3. В углублениях подвижных частей корпуса расположены пьезоэлементы из поливинил-дефторидной пленки. На корпусе закреплены плечи 2 и 5. Электрическими выводами датчика являются контакт 1 и топливопровод высокого давления, на который устанавливается датчик. Для установки датчика на топливопровод в корпусе имеется отверстие, соответствующее диаметру топливопровода. Датчик закрепляется на топливопроводе с помощью пружины 4. Пружинный зажим позволит снизить время на снятие и установку датчика. Для уменьшения массы и усилия на плечи датчика предлагается выполнять зажим в виде пластинчатой пружины.

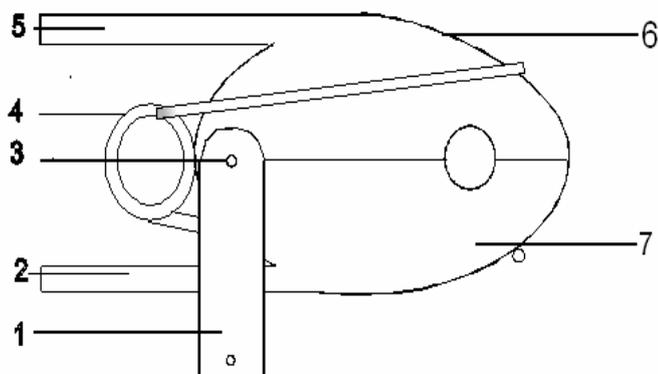


Рис. 5.34. Пружинный датчик

Для снижения трудоемкости данной операции предлагается изменить конструкцию крепления датчика. Датчик (рис. 5.35) выполняется из двух частей корпуса 7 и 10, подвижных относительно оси 3. В углублениях подвижных частей корпуса расположены пьезоэлементы из поливинилдефторидной пленки 9. На корпусе закреплены плечи 1. Электрическими выводами датчика являются контакт 6 и топливопровод высокого давления, на который устанавливается датчик. Для установки датчика на топливопровод в корпусе имеется отверстие, соответствующее диаметру топливопровода. Датчик закрепляется на топливопроводе с помощью пружинного зажима, а затем поджимается скобой 2, эксцентрик 4 и рычагом 8.

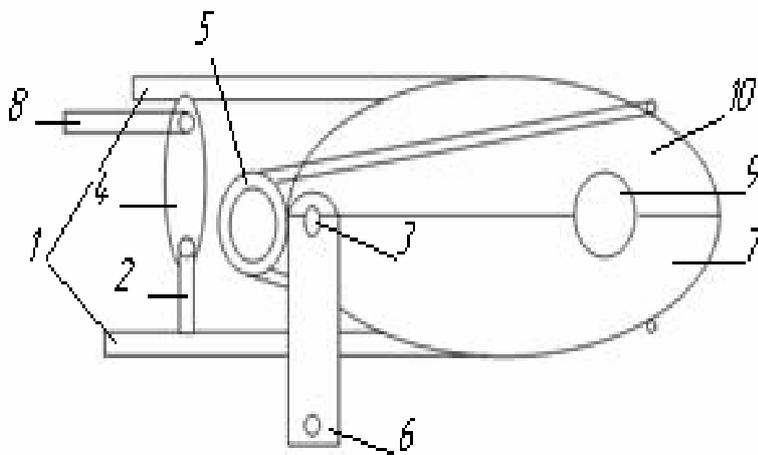


Рис. 5.35. Датчик давления с измененной конструкцией

В современном мире происходит тенденция к увеличению числа датчиков, сигнализирующих о той или иной неисправности. Важно понимать, что быстро найти причину при срабатывании такого датчика без частичной разборки или с наименьшими трудовыми затратами возможно только с применением технологически совершенных средств диагностирования. Но в настоящее время стоимость такого оборудования достаточно дорога, поэтому рациональным решением будет создание усовершенствованного датчика на базе существующего аналога. Применение предложенного крепления датчика позволит снизить трудоемкость на установку и снятие предлагаемого датчика, облегчить работу оператора.

Обработка и вывод сигнала от датчика выполнялся с помощью встроенной системы диагностирования (рис. 5.36, 5.37).

Изготовление встроенной системы диагностирования (ВСД) с точки зрения мощности и выбора комплектующих элементов не имеет особых трудностей, так как программа обработки и алгоритма постановки диагноза не большая (1000 Кбайт) и не содержит больших циклических расчетов.



Рис. 5.36. Датчики давления топлива с пружинным и эксцентриковым зажимом



Рис. 5.37. Внутренний и внешний вид встроенной системы диагностирования (начало)



Рис. 5.37. Внешний вид встроенной системы диагностирования (продолжение)



Рис. 5.37. Внешний вид встроенной системы диагностирования (окончание)

Программное обеспечение состоит из двух программ, первая из которых, защита в микроконтроллер интерфейса и обеспечивает прием, передачу информации от датчиков на ВСД. Вторая запись данных в файл, и обработку, включая постановку диагноза.

Одним из важнейших показателей работы с системой диагностирования является трудоемкость операций подготовки системы к работе и сам процесс диагностирования дизеля. Трудоемкость установки датчика составляет 0,03 чел.-ч. Трудоемкость непосредственного диагностирования, как показали хронометражные измерения составляет 0,18 чел.-ч. Такая схема не требует особой квалификации от оператора, что делает диагностирование более эффективным. Таким образом, общая трудоемкость диагностирования составляет 0,21 чел.-ч, что составляет 12,6 чел.-мин.

Для контроля технического состояния подвижного состава в отрыве от производственной базы автотранспортного предприятия (АТП) предлагается внедрить диагностический прибор, устанавливаемый в автомобиле, работа которого основана на фиксации и анализе показателей автомобиля при использовании диагностирования.

Разработанное оборудование и программное обеспечение диагностирования – составные части системы встроенной системы диагностирования (ВСД), которая включает в себя целый комплекс модулей и блоков и производит диагностирование не отдельного узла или системы, а всех основных систем двигателя и автомобиля.

Для автомобиля КАМАЗ-4308 нами разработана встроенная система диагностирования (ВСД) состоящая из существующей бортовой системы контроля (БСК), с программным модулем адаптера (рис. 5.39). ВСД рассчитана на подключение к электронному блоку управления ECM Cummins (рис.5.38).

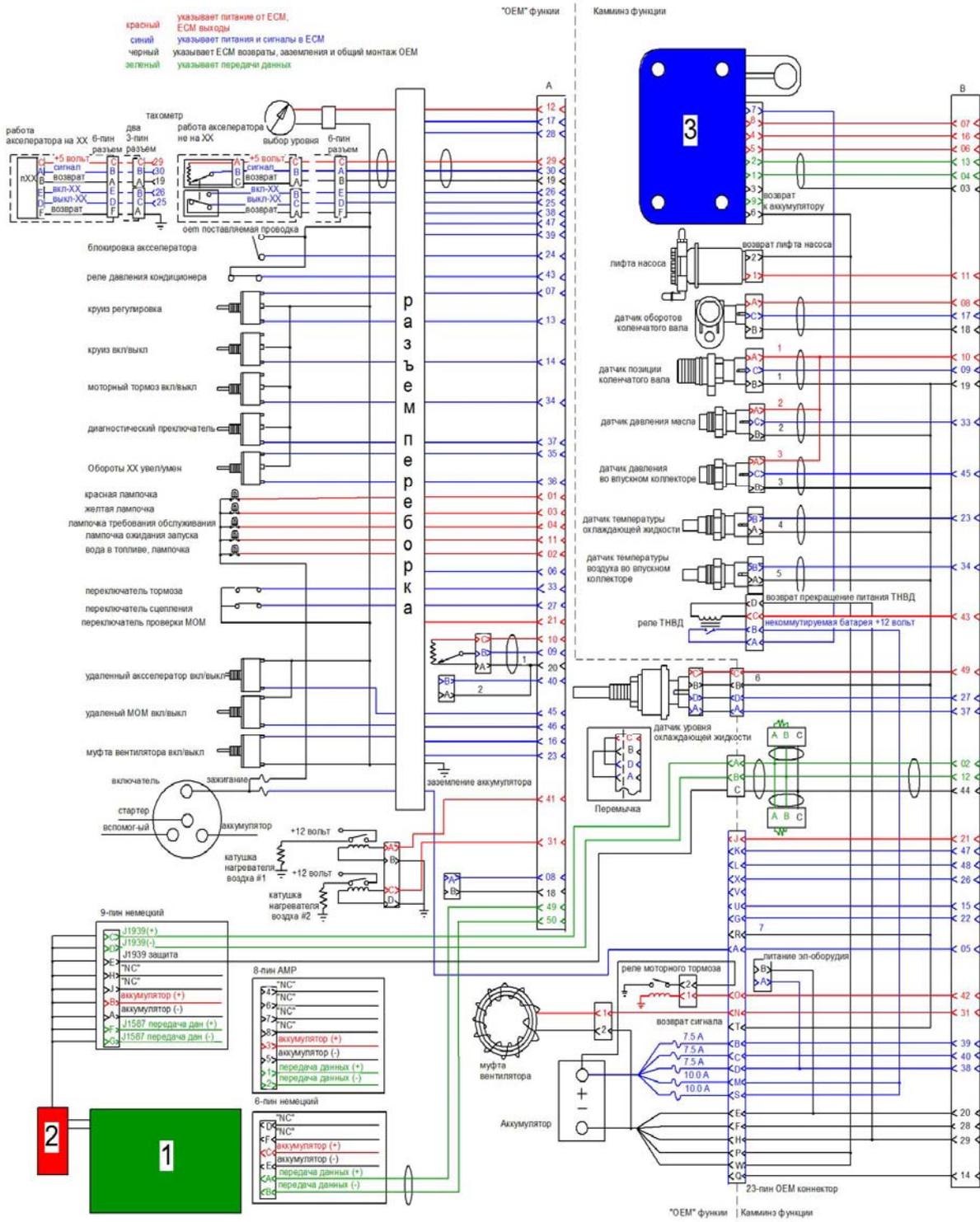


Рис. 5.38. Схема подключения встроенной системы диагностирования (1), адаптера (2) и электронного блока управления (3) к ECM Cummins КАМАЗ-4308

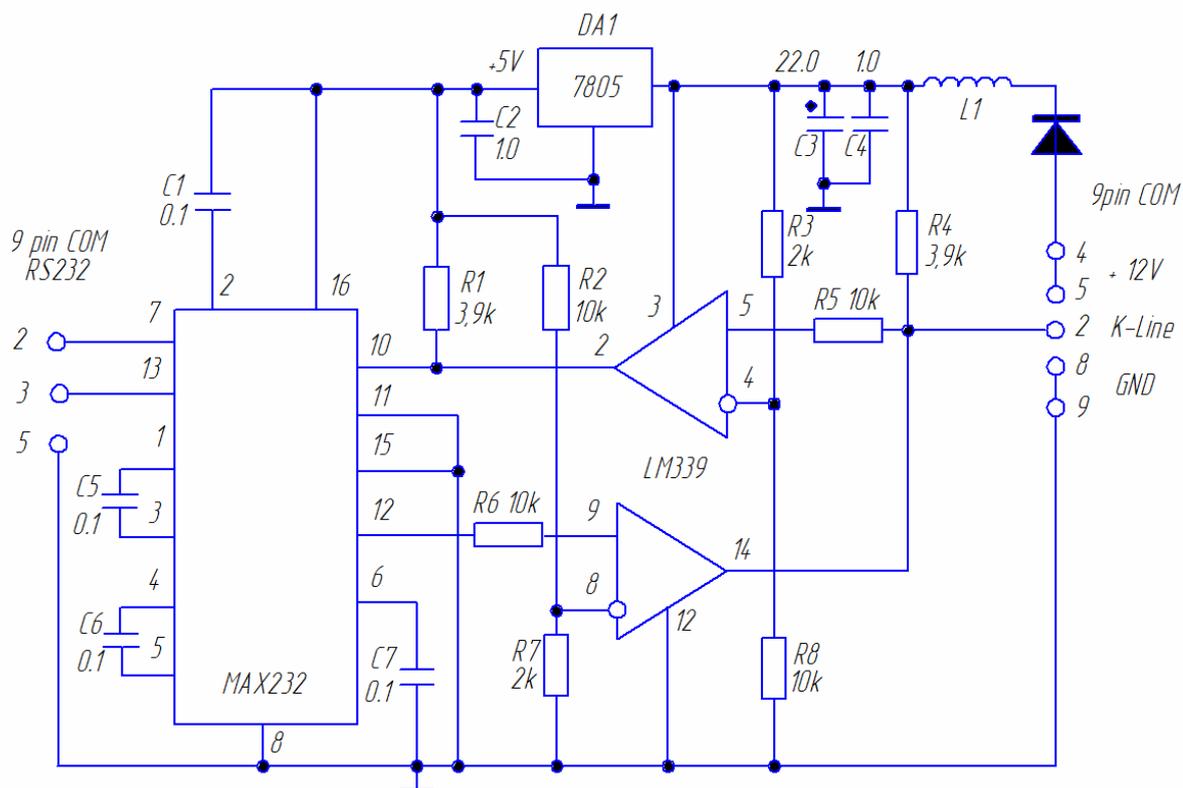


Рис. 5.39. Принципиальная схема адаптера

Бортовой компьютер (БК) позволяет отобразить различные параметры:

- расход топлива: в движении / на стоянке / мгновенный;
- расход топлива от включения зажигания (текущий цикл ВВЗ – «Вкл/Выкл Зажигания»);
- скорость автомобиля в текущей точке трека (это более точная величина, чем получаемая при усреднении с трекеров);
- ускорение: разгон, торможение (рывок) – оценка стиля вождения (как водитель тормозит и разгоняется, как часто происходят «рывки» автомобиля);
- обороты двигателя;
- нагрузка на двигатель;
- положение педали газа;
- температура: охлаждающей жидкости / во впускном коллекторе;
- давление наддува;
- момент на валу;
- ошибки, которые выдает ЭБУ (активные, неактивные);
- устройства, обнаруженные в сети;

Диагностический сканер имеет следующие функциональные возможности:

- работа по протоколу OBD-2;
- считывание кодов неисправностей;

- удаление кодов неисправностей;
- вывод параметров реального времени;
- вывод результатов внутренних тестов системы самодиагностики;
- считывание VIN-кода (для автомобилей с 2004 г.в.);
- расширенные функции (зависят от программного обеспечения);
- версия прошивки микроконтроллера ELM: 1.4.

Технически возможно, а экономически целесообразно объединить бортовой компьютер и диагностический сканер в одно устройство, которое должно устанавливаться в салоне автомобиля на штатное место, предусмотренное для бортового компьютера.

Список контролируемых автосканером параметров узлов: аккумулятор, антиблокировочная система тормозов, аудио система, газоразрядная лампа, генератор, гидроусилитель руля, датчик угла поворота рулевого колеса, двери, двигатель, зеркала, иммобилайзер, климат-контроль, колеса, кондиционер, круиз-контроль, кузов, GPS-навигация, парктроник, пневматическая подвеска, подушки безопасности, приборная панель, радио, ручной тормоз, салон, сидения, телевизор, тормозная система, трансмиссия, тяги, центральный замок.

Предлагаемая встроенная система диагностирования предназначена для использования водителем автомобиля или механиком АТП и выдачи данных на ВСД или ЭВМ о работе и техническом состоянии автомобилей. Обеспечивается практически непрерывным контролем всех ответственных узлов по функциональным параметрам и обобщенным показателям работоспособности важнейших агрегатов. Позволяет выявлять предотказные состояния узлов, определяющих наибольшую частоту обращений в ремонтную зону АТП, а также снижение функциональных качеств, представляющих угрозу для безопасности движения. В частности контроль топливной экономичности, состояние аккумуляторной батареи, неравномерность действия тормозов и др.

В режиме опроса позволяет выявить абсолютное большинство возможных неисправностей автомобиля. Из режима ВСД или при запуске системы выбирается режим автономного опроса к поиску неисправностей путём опроса водителя автомобиля, который выбирает из предложенных вариантов неправильной работы двигателя или автомобиля наиболее характерные признаки, которые он заметил на своём автомобиле. Далее приводится один из возможных путей формирования заявки о неисправности (рис. 5.40-5.47).

Для перемещения по меню используются «стрелки», выбор позиций осуществляется нажатием клавиши «Space». Переход к следующему меню в древовидной структуре осуществляется нажатием клавиши «ДАЛЕЕ».

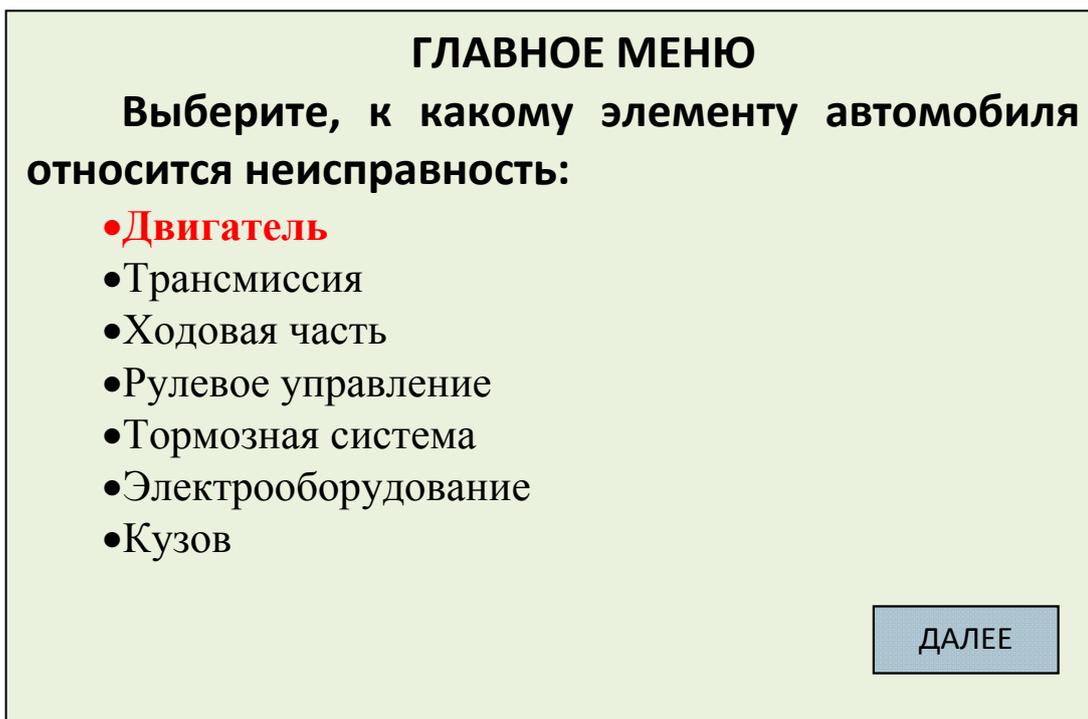


Рис. 5.40. Главное меню

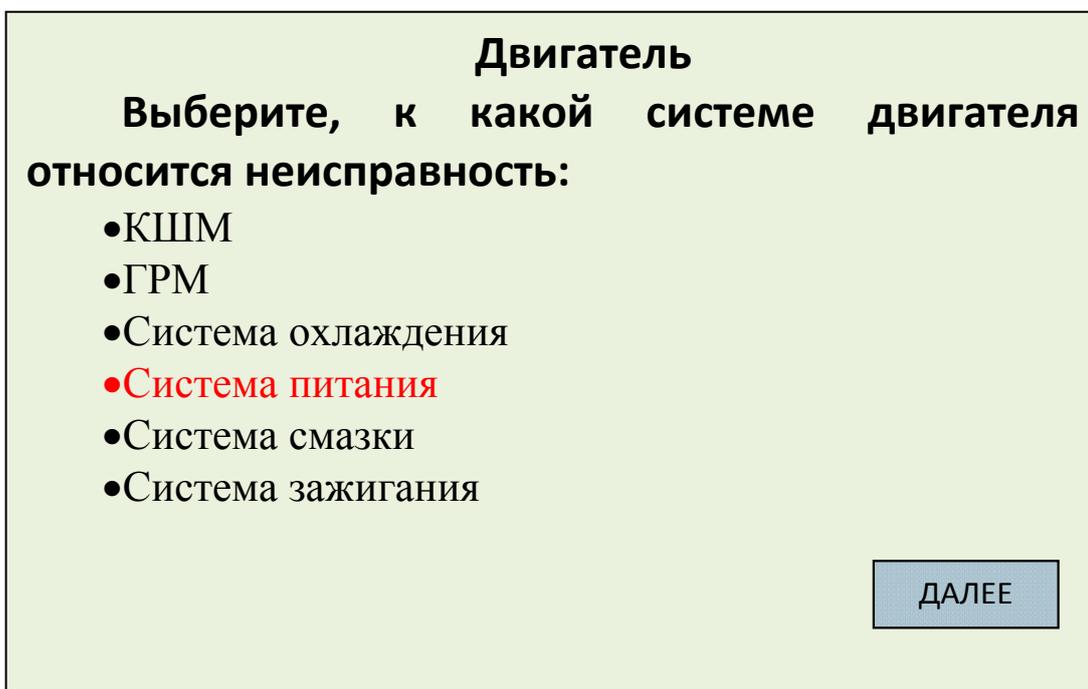


Рис. 5.41. Выбор системы автомобиля

Двигатель

Выберите, к какому элементу системы питания относится неисправность:

- Топливная система высокого давления
- Топливная система низкого давления
- Система подачи воздуха**
- Система отработавших газов

Рис. 5.42. Выбор элемента двигателя

Двигатель

Выберите, к какому элементу системы подачи воздуха относится неисправность:

- Воздушный фильтр
- ТКР**
- Воздухопроводы

Рис. 5.43. Выбор элемента топливной системы высокого давления

Двигатель, ТКР

Выберите, признаки неисправности

- **Двигатель не развивает полную мощность**
- Черный дым из выхлопной трубы
- Синий дым из выхлопной трубы
- Повышенный расход масла
- Шумная работа турбокомпрессора
- Повышенная тепловая напряжённость ТКР

[ДАЛЕЕ](#)

Рис. 5.44. Выбор системы узла автомобиля

Двигатель, ТКР

Наиболее вероятные причины неисправностей:

- Уменьшение количества энергии, поступающей с ОГ от двигателя
- **Нарушение герметичности воздухопроводов**
- Нарушение герметичности байпасного клапана
- Нарушение в работе соплового аппарата (закольцовывание газов)
 - Наличие повышенного сопротивления вращению вала турбокомпрессора.
 - Наличие механических повреждений на турбинном колесе
 - Наличие механических повреждений на компрессорном колесе

[ДАЛЕЕ](#)

Рис. 5.45. Выбор характерного признака автомобиля

Последовательность опроса по этим вопросам зависит от частоты появления признаков и составляется на основании статистических данных, собранных в условиях эксплуатации. На основании полученной информации на этом этапе определяются вероятные гипотезы – элементы двигателя, подозреваемые на отказ.

По завершении этапа выбора качественных признаков в системе происходит просмотр базы данных и формирование рабочего набора предполагаемых неисправностей, обеспечивающих решение задачи поиска неисправностей.

После определения качественного признака следует определить причину неисправности. Система в диалоге проводит опрос пользователя о том, какая наработка двигателя, какие ремонтно-обслуживающие работы проводились в последнее время, как он заметил появление качественного признака, какие работы выполнял, какие ещё сопутствующие качественные признаки проявляются при этом. На этом этапе взаимодействие пользователя с системой происходит посредством последовательного предъявления пользователю вопросов системы и выбором им вариантов ответа в меню различных типов.

На рисунках опросной части приводится один из возможных вопросов, предъявляемых системой пользователю при поиске неисправности на втором этапе.

По результатам опроса уточняются вероятности рассматриваемых гипотез. В ряде случаев, основываясь только на результатах ответов на вопросы, можно принять диагностическое решение. Диагностическая система обладает знаниями о типичных ситуациях, соответствующих наличию наиболее часто встречающихся неисправностей. В ходе опроса система анализирует полученную информацию и формирует гипотезы о неисправностях. По завершении определяется вероятная причина неисправности.

Взаимодействие пользователя с системой происходит посредством последовательного предъявления заданий на проведение диагностических проверок. Например, выбор режима частоты вращения коленчатого вала. При этом пользователю доступна инструкция о технологии проведения проверки. По результату проверки пользователь выбирает вариант ответа в меню. Работа системы заканчивается рекомендациями по устранению неисправности.

После обнаружения неисправности система предлагает пользователю решить вопрос о продолжении поиска. Если обнаруженная неисправность оказалась ошибочной или после восстановления неисправности работа двигателя не нормализовалась, рекомендуется продолжить поиск.

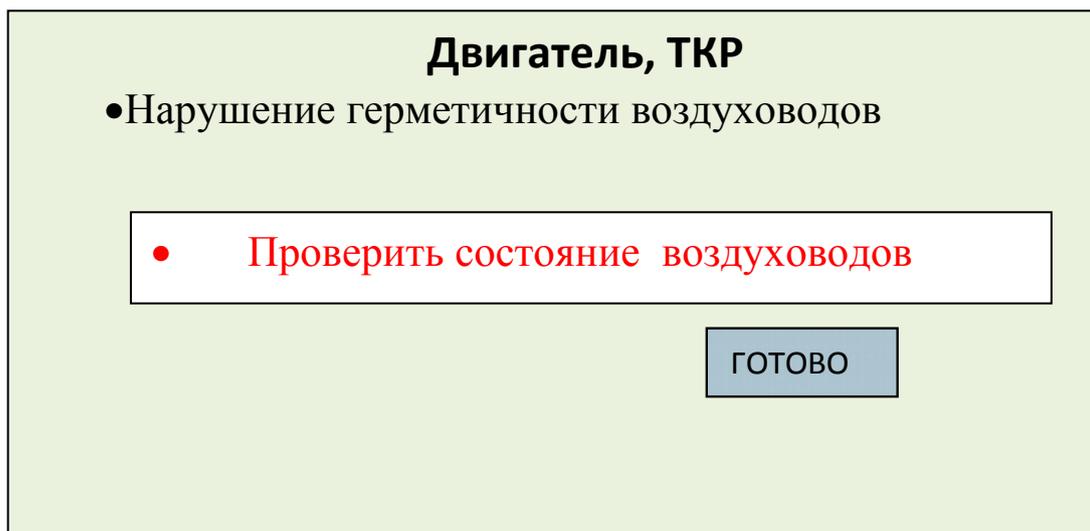


Рис. 5.46. Устранение неисправности

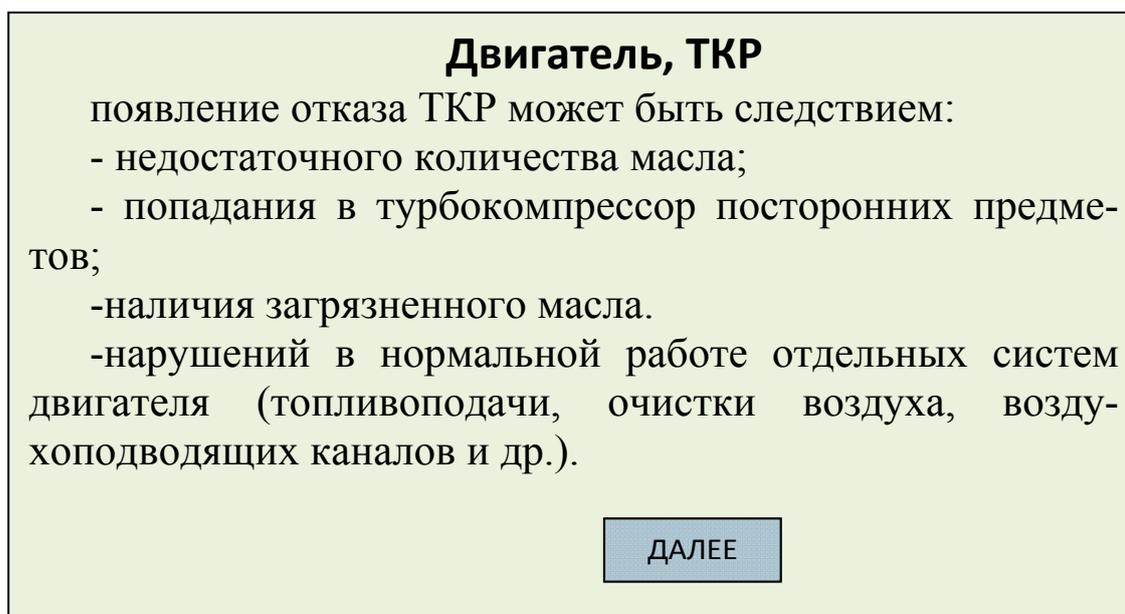


Рис. 5.47. Следствия появления отказа ТКР

В случае недостатка знаний для поиска неисправностей или при поступлении от пользователя некорректной информации, система предлагает выйти в операционную систему или начать поиск заново.

Ухудшение технического состояния автотранспортных средств является причиной дорожных отказов. Более частому проведению диагностирования препятствуют ограничения экономического характера. Кроме того, значительная доля парка эксплуатируется без диагностирования, нередко в отрыве от автотранспортного предприятия, в мелких ведомственных и личных плохо оснащенных гаражах.

Диагностирование только внешними средствами не обеспечивает предотвращение эксплуатации автомобилей с неисправностями, аварийных дорожных отказов, оптимизации выбора режима движения и проведения ТО и ТР. Оно не устраняет накопление неисправностей на межконтрольном пробеге, так в среднем более 20 % парка эксплуатируется с такими неисправностями. Применение встроенного диагностирования, а также вероятностного и логического метода поиска неисправностей позволит снизить количество отказов автомобилей на линии и использовать такие средства для группы автомобилей.

5.3. Расчет экономической эффективности метода диагностирования

В табл. 5.2 приведены стоимости диагностирования по типовой и предлагаемой технологии. Цена отдельных диагностических операций представлена на состояние 01.09.2014 г. в г. Саранске по данным станций технического обслуживания. Как видно из табл. 5.2, общая стоимость диагностических работ по предлагаемой технологии на 3500 руб. ниже по сравнению с типовой за счет сокращения числа диагностических операций.

Т а б л и ц а 5.2

Стоимость услуг диагностирования

Наименование	Типовая технология, руб.	Предлагаемая технология, руб.
Внешний осмотр	100	100
Диагностирование I этап	-	400
Диагностирование II этап	-	1000
Снятие турбокомпрессора с ДВС	500	-
Проверка ТКР на стенде	2000	
Проверка давления наддува ГОСТ АМ-1К	400	-
Проверка герметичности впускного тракта КИ-13948	500	-
Проверка сопротивления воздухоочистителя ДНМ-100	200	-
Проверка выпускной системы	800	-
Разборка турбокомпрессора	500	-
Диагностический вывод	-	-
Итого	5000	1500

Таблица 5.3

Стоимость диагностического оборудования

Наименование	Типовая технология, руб.	Предлагаемая технология, руб.
Стенд «TurboTest» СИМАТ (Польша)	800000	-
Прибор для проверки герметичности впускного тракта КИ-13948	3 945	-
Манометр для проверки сопротивления воздухоочистителя ДНМ-100	1 830	-
Манометр для проверки выпускной системы МПТИ-У2	3 300	-
Разработанный компьютеризированный система с датчиками:	-	
– система датчиков	-	3 800
– плата сбора данных NI USB -6009 компании National Instruments	-	13 800
– встроенное диагностирование	-	36000
Итого	809075	53600

Как следует из таблицы 5.3, стоимость диагностического оборудования и оснастки предлагаемой технологии по сравнению с типовой ниже на 438175 руб.

Экономический эффект от внедрения технологии диагностирования определяется из сопоставления приведённых затрат по базовой и предлагаемой технологиям [49, 50, 109, 110]:

$$\mathcal{E} = (C_{\text{баз}} - C_{\text{пр}}) \cdot N, \quad (5.1)$$

где $C_{\text{баз}}$ – себестоимость диагностирования дизельного двигателя с газотурбинным наддувом рассчитанный по базовому способу составляет $C_{\text{баз}} = 1319,5$ руб.; $C_{\text{пр}}$ – себестоимость диагностирования турбокомпрессора дизельного двигателей по разработанной технологии, руб.; N – количество диагностируемых дизельных двигателей с газотурбинным наддувом, шт.

Себестоимость диагностирования рассчитывается по формуле

$$C = C_{\text{озп}} + C_{\text{дзп}} + C_{\text{сс}} + C_{\text{вп}} + C_{\text{укв}}, \text{ руб.} \quad (5.2)$$

где $C_{\text{озп}}$ – основная зарплата мастера диагноста, руб.; $C_{\text{дзп}}$ – дополнительная зарплата, руб.; $C_{\text{сс}}$ – начисление по социальному страхованию, руб.; $C_{\text{вп}}$ – внепроизводственные расходы, руб.; $C_{\text{укв}}$ – удельные затраты на капитальные вложения, руб.

Проведем расчет себестоимости диагностирования турбокомпрессора автотракторного дизельного двигателя при помощи предлагаемого способа
Основная зарплата на диагностирование одного турбокомпрессора:

$$C_{\text{озп}} = k_{\text{в}} \cdot T_{\text{в}}, \text{ руб.} \quad (5.3)$$

где $k_{\text{в}}$ – норма времени на диагностирование одного турбокомпрессора (по хронометражу); $T_{\text{в}}$ – часовая тарифная ставка мастера-диагноста, руб./ч, $T_{\text{в}} = 32,34$ руб./ч.

$$C_{\text{озп баз}} = 1,9 \cdot 32,34 = 61,45 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{озп пр}} = 0,5 \cdot 32,34 = 16,17 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработанная плата:

$$C_{\text{дзп}} = \frac{30 \cdot C_{\text{озп}}}{100}, \text{ руб.} \quad (5.4)$$

Для типовой технологии

$$C_{\text{дзп. баз}} = \frac{30 \cdot 61,45}{100} = 18,43 \text{ руб.}$$

Для предлагаемой технологии

$$C_{\text{дзп. пр}} = \frac{30 \cdot 16,17}{100} = 4,85 \text{ руб.}$$

Начисления по страховым взносам и страхованию от несчастных случаев:

$$C_{\text{сс}} = \frac{(30 + 1,1) \cdot (C_{\text{озп}} + C_{\text{дзп}})}{100}, \text{ руб.} \quad (5.5)$$

Для типовой технологии

$$C_{\text{сс. баз}} = \frac{31,1 \cdot (18,43 + 61,45)}{100} = 24,84 \text{ руб.}$$

Для предлагаемой технологии

$$C_{\text{сс. пр}} = \frac{31,1 \cdot (16,17 + 4,85)}{100} = 6,53 \text{ руб.}$$

Внепроизводственные накладные расходы:

$$C_{\text{вп}} = \frac{1,116 \cdot (C_{\text{озп}} + C_{\text{дзп}} + C_{\text{сс}})}{100}, \text{ руб.} \quad (5.6)$$

Для типовой технологии

$$C_{\text{вп баз}} = \frac{1,116 \cdot (61,45 + 18,43 + 24,84)}{100} = 1,16 \text{ руб.}$$

Для предлагаемой технологии

$$C_{\text{вп пр}} = \frac{1,116 \cdot (16,17 + 4,85 + 6,53)}{100} = 0,30 \text{ руб.}$$

Удельные затраты на капитальные вложения (стоимость установки и оснастки):

$$C_{\text{укв}} = E \cdot \frac{C_{\text{уст}}}{N}, \quad (5.7)$$

где E – коэффициент эффективности капитальных вложений, $E = 0,15$; $C_{\text{уст}}$ – стоимость установки (табл. 5.3).

Удельные затраты на капитальные вложения с программой ремонта $N = 100$ турбокомпрессоров в год составят

Для типовой технологии

$$C_{\text{укв баз}} = 0,15 \cdot 809075 / 100 = 1213,6 \text{ руб.}$$

Для предлагаемой технологии

$$C_{\text{укв пр}} = 0,15 \cdot 53600 / 100 = 80,4 \text{ руб.}$$

Тогда себестоимость диагностирования одного турбокомпрессора составит

Для типовой технологии

$$C_{\text{баз}} = 61,45 + 18,43 + 24,84 + 1,16 + 1213,6 = 1319,5 \text{ руб.}$$

Для предлагаемой технологии

$$C_{\text{пр}} = 16,17 + 4,85 + 6,53 + 0,30 + 80,4 = 108,25 \text{ руб.}$$

Экономический эффект от внедрения технологии диагностирования составит

$$\mathcal{E} = (1319,5 - 108,25) \cdot 100 = 121125 \text{ руб./год.}$$

Срок окупаемости капиталовложений:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\mathcal{E}}. \quad (5.8)$$

где K – капиталовложение на предлагаемую установку (табл. 5.3).

$$T_{\text{ок}} = \frac{53600}{121125} = 0,44 \text{ года.}$$

Таким образом, экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии диагностирования турбокомпрессоров автотракторных дизельных двигателей предлагаемым методом составит 18530 руб. на программу 100 диагностирований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях технического прогресса распознавать неисправности в современных автомобилях на автотранспортных предприятиях, опираясь только на опыт и интуицию водителей сегодня уже невозможно.

Для решения этой проблемы требуется применение современного диагностического оборудования, перспективы развития которого необходимо знать будущим инженерам.

В монографии предлагается устройство и принцип работы наиболее сложного оборудования для диагностирования автомобилей. Большое внимание уделено вопросам встроенного диагностирования ТРК автомобилей.

В работе обосновано применение менее материалоемких и более производительных средств диагностирования автомобилей.

Приведена методика определения параметров систем диагностирования системы питания автомобилей с дизельными двигателями.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель, позволяющая комплексно изучать взаимосвязи показателей работы двигателя и турбокомпрессора. Установлено, что работоспособность ТКР в эксплуатации может быть оценена системой показателей: КПД турбокомпрессора и частотой вращения ротора во всем диапазоне изменения скоростного режима работы двигателя. Получены количественные оценки показателей правильного функционирования турбокомпрессора в условиях моторных испытаний двигателя на номинальном режиме: $n_{tk} = 105000$ об/мин; $\eta_{tk} = 0,40$; $\eta_k = 0,62$; $\eta_t = 0,75$; $\eta_{tkm} = 0,92$; $\pi_k = 1,52-1,53$; $\pi_t = 1,58-1,60$.

2. Разработана методика оценки качества функционирования ТКР в эксплуатации по частоте вращения ротора ТКР и его разгонным характеристикам. Обосновано, что соотношение частот вращения ротора турбокомпрессора в эксплуатации $n_{tэ}$ относительно нормативной, устанавливаемой заводом-изготовителем n_t , может быть принято в качестве оценочного диагностического параметра технического состояния турбокомпрессора. При $\frac{n_{tэ}}{n_t} = 0,95 \div 1,05$ турбокомпрессор соответствует исправному состоянию. При $\frac{n_{tэ}}{n_t} = 0,85 \div 0,95$ показатели работы турбокомпрессора не соответствуют нормативным значениям (техническое состояние – «начало зарождения неисправности»). При $\frac{n_{tэ}}{n_t} < 0,85$ дальнейшая эксплуатация ТКР может привести к аварийным последствиям.

Для исправного состояния ТКР 6.1, установленного на двигателе Д-245-35, получены значения времени разгона $t_1=3,5$ с, при амплитудном значении частоты вращения ротора $A_1=105000$ об/мин и КПД турбокомпрессора $\eta_{tk} = 0,4$. Снижение η_{tk} до 0,3 приводит к возрастанию времени разгона до 5,5 с и уменьшению амплитудного значения частоты вращения вала ТКР до 86000 об/мин.

3. Разработана методика расчета предельных по теплонапряженности двигателя значений КПД турбокомпрессора. На программное обеспечение получен охранный документ РФ «Программа определения технического состояния турбокомпрессора» (свидетельство №2014616619). Разработано средство диагностического контроля параметров функционирования ТКР по частоте вращения ротора (Патент №145761).

4. Разработана технология диагностирования системы наддува двигателей мобильной сельскохозяйственной техники, позволяющая в эксплуатации получить экономический эффект на программу 100 диагностирований в сумме 118530 руб. в год.

Полученные результаты при модернизации существующего оборудования могут использоваться преподавателями и аспирантами высших технических учебных заведений, будут полезны студентам при выполнении курсовых и дипломных работ и проектов, а также полученную информацию можно использовать на производстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев, О.А. Обоснование средств диагностирования турбокомпрессоров мобильных энергетических средств [Текст]: автореф. дис.... канд. техн. наук / О.А. Алексеев. – Оренбург: Оренбургский ГУ, 2007. – 16 с.
2. Ананьин, А.Д. Диагностика и техническое обслуживание машин [Текст] / А.Д. Ананьин, В.М. Михлин, И.И. Габитов, А.В. Неговора. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 432 с.
3. Асатурян, С.В. Совершенствование методики и средств диагностирования тракторных двигателей с турбонаддувом [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.В. Асатурян. – Зерноград, 2010. – 18 с.
4. Ахметов, Г.М. Исследование и обоснование безмоторных методов испытания дизелей с газотурбинным наддувом [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г.М. Ахметов. – М., 1980. – 27 с.
5. Баширов, Р.М. Основы теории и расчета автотракторных двигателей [Текст] / Р.М. Баширов. – Уфа: БГАУ, 2008. – 304 с.
6. Байков, Б.П. Турбокомпрессоры для наддува дизелей [Текст] / Б.П. Байков, В.Г. Бордуков, П.В. Иванов, Р.С. Дей. – Л.: Машиностроение Ленинградское отделение, 1975. – 84 с.
7. Баутин, В.М. Информационные ресурсы инженерно-технические системы АПК [Текст] / В.М. Баутин, Д.С. Буклагин, Э.Л. Аронов, Д.Д. Демидов. – М.: Росинформагротех, 2001. – 56 с.
8. Бельских, В.И. Справочник по техническому обслуживанию и диагностированию тракторов [Текст] / В.И. Бельских. – М.: Россельхозиздат, 1986. – 399 с.
9. Бельских В.И. Диагностирование и обслуживание сельскохозяйственной техники [Текст] / В. И. Бельских. – М.: «Колос», 1980. – 575 с.
10. Биргер, И.А. Техническая диагностика [Текст] / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
11. Бобков, Ю.К. Техническая диагностика двигателей внутреннего сгорания по параметрам рабочих процессов [Текст] / Ю.К. Бобков, Ю.М. Горский, Е.А. Чернышев. – М.: ГОСНИТИ, 1973. – 172 с.
12. Буклагин, Д.С. Состояние и перспективные направления автоматизации сельскохозяйственных агрегатов [Текст]: аналит. обзор / Д.С. Буклагин [и др.]. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 128 с.
13. Бышов, Н.В. Повышение готовности к использованию по назначению мобильной техники совершенствованием системы диагностирования [Текст]: моногр. / Н.В. Бышов [и др.]. – Рязань: Изд-во «ФГБОУ ВПО РГАТУ», 2013. – 187 с.
14. Бышов, Н.В. Периодичность контроля технического состояния мобильной сельскохозяйственной техники [Электронный ресурс] / Н.В. Бышов [и др.]// Политематический сетевой электронный научный

журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 81. – С. 390-400.

15. Васильев, Ю.А. Повышение эффективности диагностирования машин [Текст] / Ю.А. Васильев // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1989. – № 10. – С. 122 – 127.

16. Величкин, И.Н. Факторы, влияющие на надежность машин [Текст] / И.Н. Величкин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1999. – №8.

17. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей [Текст] / Е.С. Вентцель. – М.: «Наука», 1969. – 572 с.

18. Власкин, В.В. Повышение долговечности турбокомпрессоров дизельных двигателей восстановлением изношенных деталей методом электроискровой обработки [Текст]: автор. дис. ... канд. техн. наук / В.В. Власкин. – Саранск, 2004. – 18 с.

19. Волков, А.В. Виброакустическая диагностика тепловозных турбокомпрессоров [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Волков, РГУПС. – Ростов н/Д, 2005.

20. Габитов, И.И. Совершенствование технологий и средств технического сервиса автотракторной и мобильной техники [Текст] / И.И. Габитов, А.В. Неговора // Перспективы инновационного развития АПК: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. в рамках XXIV Междунар. специализированной выставки «Агрокомплекс–2014». – 2014. – С. 167-173.

21. Гаврилов, К.Л. Профессиональная диагностика ДВС, систем: топливоснабжения, зажигания, энергоснабжения, пуска автомобилей, дорожно-строительных и сельскохозяйственных машин [Текст] / К.Л. Гаврилов. – СПб.: Федеральное Государственное Учреждение «Российский центр сельскохозяйственного консультирования», 2012. – 720 с.

22. Дятлов, В.А. Контроль динамических систем [Текст] / В.А. Дятлов, А.Н. Кабанов, Л.Т. Милов. – Л.: Энергия, 1978. – 88 с.

23. ГОСТ 18509-88 (СТ СЭВ 2560-80). Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 70 с.

24. ГОСТ 20417-75. Техническая диагностика. Общие положения о порядке разработки систем диагностирования [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 4 с.

25. ГОСТ 20760-85. Техническая диагностика. Тракторы. Параметры и качественные признаки технического состояния [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 12 с.

26. ГОСТ 23435-79. Техническая диагностика. Двигатели внутреннего сгорания. Номенклатура диагностических параметров [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 8 с.

27. ГОСТ 23564-79 Техническая диагностика. Показатели диагностирования [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 16 с.

28. ГОСТ 24925-81 Техническая диагностика. Тракторы. Приспособленность к диагностированию [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 14 с.
29. ГОСТ 25044-81 Техническая диагностика. Диагностирование автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных, строительных и дорожных машин. Основные положения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 9 с.
30. ГОСТ 25176-82 Техническая диагностика. Средства диагностирования автомобилей, тракторов, строительных и дорожных машин. Классификация. Общие технические требования [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 17 с.
31. ГОСТ 27.310 – 95. Анализ видов, последствий и критических отказов [Текст]. – Минск. Изд-во Стандартов, 1995. – 12 с.
32. ГОСТ 53637-2009. Турбокомпрессоры автотракторные. Общие технические требования и методы испытаний [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2010. – 10 с.
33. ГОСТ 7057-86. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 25 с.
34. ГОСТ 22870-84. Техническая диагностика. Тракторы сельскохозяйственные. Правила диагностирования [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 8 с.
35. Государственная система обеспечения единства измерений. Динамические измерения. Термины и определения. МИ 1951-88 [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 17 с.
36. Гутников, В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах [Текст] / В.С. Гутников. – 2-е изд., перераб., и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 132 с.
37. Диагностика, надежность и ремонт машин [Текст]: сб. науч. тр./ Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. – М.: МАУ, 1995. – 80 с.
38. Дизели 2-245.7, Д-245.9, Д-245.12С. Руководство по эксплуатации 245.7 – 0000100РЭ [Текст]. – Минск, 2008. 79 с.
39. Дизели [Текст]: справочник / под общ. ред. В. А. Ваншейдта. – 3-е изд. – Л.: Машиностроение, 1977. – 477 с.
40. Добролюбов, И.П. Обоснование признаков классификации при экспресс-экспертизе состояния ДВС с помощью измерительного технологического комплекса [Текст] / И.П. Добролюбов // Двигателестроение. – 1999. – №2. – С.25-29.
41. Добролюбов, И.П. Информационная ценность признаков при распознавании состояния ДВС измерительной экспертной системой [Текст] / И.П. Добролюбов, О.Ф. Савченко, В.В. Альт // Агроинженерная наука – итоги и перспективы: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: НГАУ, 2004. – Ч. 2. – С.226 – 234.

42. Дорошко, С.М. Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам [Текст] / С.М. Дорошко. – М.: Транспорт, 1984. – 128 с.
43. Доценко, Б.И. Диагностирование динамических систем [Текст] / Б.И. Доценко. – К.: Техника, 1983. – 159 с.
44. Дьяков, Р.А. Воздухоочистка в дизелях [Текст] / Р.А. Дьяков. – Л.: Машиностроение, 1975. – 152 с.
45. Дьячков, А.Я. Управление процессом сгорания топлива в дизеле с учетом режимов его работы [Текст] / А.Я. Дьячков // Межвуз. сб. науч. тр. – Пермь, 1988. – С. 107.
46. Ждановский, Н.С. Диагностика автотракторных двигателей с использованием электронных приборов [Текст] / Н.С. Ждановский, В.А. Аллилуев, В.М. Шхлин. – М-Л.: ГОСНИТИ, 1973. – 125 с.
47. Ждановский, Н.С. Диагностика дизелей автотракторного типа [Текст] / Н.С. Ждановский, Б.А. Улитовский, В.А. Аллилуев. – М.: Колос, 1970. – 32 с.
48. Иванов, Н.Б. Каталог средств измерений, испытаний, контроля и диагностирования, применяемых при ремонте и техническом обслуживании тракторов и сельскохозяйственных машин [Текст] / Н.Б. Иванов, Г.И. Маркова, Л.С. Казуро. – М.: ГОСНИТИ, 1988. – 65 с.
49. Игнатов, В.А. Эффективность систем диагностирования [Текст] / В.А. Игнатов, В.В. Уланский, В.К. Горемыкин // Оценка характеристик качества сложных систем и системный анализ: сб. науч. тр. – М.: АН СССР, 1978. – С. 134-141.
50. Инструкция по оценке экономической эффективности создания и использования диагностических средств [Текст]. – М.: ГОСНИТИ, 1978. – 81 с.
51. Иншаков, А.П. Автоматизированный комплекс для диагностирования систем наддува воздуха в двигателях МЭС [Текст] / А.П. Иншаков, А.Н. Кувшинов, И.И. Курбаков // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 10. – С. 16–18.
52. Иншаков, А.П. Способ диагностирования системы воздухоподдачи тракторного дизеля [Текст] / А.П. Иншаков, И.И. Курбаков, А.Н. Кувшинов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – №3. – С. 67–71.
53. Иншаков А.П. Диагностирование турбокомпрессора автотракторного дизельного двигателя на обкаточно-тормозном стенде КИ 5543 ГОСНИТИ [Текст] / А.П. Иншаков, А.Н. Кувшинов, И.И. Курбаков, О.Ф. Корнаухов // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №1. – С. 39 – 41.
54. Иншаков, А.П. Экспериментальные исследования системы диагностирования турбонаддува автотракторного двигателя Д-245-35 [Текст] /

А.П. Иншаков, А.Н. Кувшинов, И.И. Курбаков, О.Ф. Корнаухов // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №5. – С. 45 – 47.

55. Иншаков, А.П. Диагностика турбокомпрессоров на стенде КИ-5543 [Текст] / А.П. Иншаков, А.Н. Кувшинов, И.И. Курбаков, О.Ф. Корнаухов // Сельский механизатор. – 2013. – №12. – С. 39.

56. Иншаков, А.П. Программный комплекс «ДИЗЕЛЬ РК» [Текст]/ А.П. Иншаков, И.И. Курбаков // Сельский механизатор. – 2013. – №12. – С. 45.

57. Иншаков, А.П. Аппаратное средство контроля работоспособности турбокомпрессора [Текст] / А.П. Иншаков, И.И. Курбаков, А. Н. Кувшинов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвуз. сб. науч. тр. / редкол.: А.В. Котин [и др.]. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 137 – 141.

58. Иншаков, А.П. Диагностика турбокомпрессоров с помощью информационно-измерительного комплекса [Текст] / А.П. Иншаков, И.И. Курбаков, А.Н. Кувшинов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвуз. сб. науч. тр. / редкол.: А.В. Котин [и др.]. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 142 – 143.

59. Иншаков, А.П. Средство получения диагностической информации при моторных испытаниях турбокомпрессора [Текст] / А.П. Иншаков, А.Н. Кувшинов, О.Ф. Корнаухов, И.И. Курбаков // Совершенствование конструкции, эксплуатации и технического сервиса автотракторной и сельскохозяйственной техники. – Уфа: Изд-во БГАУ, 2013. – С. 133 – 137.

60. Иншаков, А.П. Влияние неисправностей в системе воздухоподачи на показатели наддува автотракторного двигателя [Текст] / А.П. Иншаков, А.Н. Кувшинов, И.И. Курбаков, О.Ф. Корнаухов // Вестник Нижегородской сельскохозяйственной академии. – 2013. – Т.3. – Н.Новгород, 2013. – С. 71 – 75.

61. Иншаков, А.П. Лабораторный информационно-измерительный комплекс для моторных испытаний турбокомпрессора [Текст] / А.П. Иншаков, А.Н. Кувшинов, И.И. Курбаков, О.Ф. Корнаухов // Вестник Нижегородской сельскохозяйственной академии. – 2013. – Т. 3. – Н.Новгород, 2013. – С. 75 – 80.

62. Иншаков, А.П. Использование современных вычислительных средств и плат сбора данных при исследовании систем наддува дизельных двигателей на обкаточно-тормозном стенде КИ 5543 ГОСНИТИ [Текст] /А.П. Иншаков, А.Н. Кувшинов, И.И. Курбаков // Промышленный салон. Ремонт. Восстановление. Реновация: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2014. – 261 с.

63. Иншаков. А.П. Информационно-измерительный комплекс для диагностики турбокомпрессоров тракторных дизелей [Текст] / А.П. Иншаков, И.И. Курбаков, А.Н. Кувшинов // Научное сопровождение инновационного

развития агропромышленного комплекса: теория, практика, перспективы: материалы 65-й Междунар. науч.-практ. конф. 20-21 мая 2014 года. – Рязань: Изд-во РГАУ, 2014. – Часть 2. – 237 с. – С.101-104.

64. Иншаков, А.П. Измерительные модули для диагностики турбокомпрессоров [Текст] / А.П. Иншаков, А.Н. Кувшинов, С.С. Родионов // Сельский механизатор. – 2011. – №8. – С. 40 – 41.

65. Иншаков, А.П. Контроль давления наддува при диагностировании турбокомпрессоров тракторных дизелей [Текст] / А.П. Иншаков, А.Н. Кувшинов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 1. – С. 24 – 25.

66. Иншаков, А.П. Необходимость комплексного подхода к диагностированию систем наддува тракторных дизелей [Текст] / А.П. Иншаков, А.Н. Кувшинов, О.Ф. Корнаухов // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 10. – С. 15 – 16.

67. Иншаков, А.П. О средствах и методах диагностирования мобильных энергетических средств [Текст] / А.П. Иншаков, А.Н. Кувшинов, А.В. Настюшкин, А.В. Филин // XXXVII Огаревские чтения: материалы науч. конф. в 3 ч. Ч. 3: Технич. науки. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. – 160 с.

68. Иншаков, А.П. К вопросу обоснования пределов варьирования показателей работы тракторного дизеля с газотурбинным наддувом [Текст] / А.П. Иншаков // Техническое обеспечение перспективных технологий: сб. науч. тр. – Саранск, 1995. – С. 79-82.

69. Иншаков, А.П. Корректирование топливоподачи по давлению наддува как способ улучшения эксплуатационных свойств МТА [Текст] / А.П. Иншаков // Международная научно-техническая конференция «Новые методы ремонта и восстановления деталей сельскохозяйственных машин»: Сб. материалов. – Саранск, 2001. – С. 136-139.

70. Иншаков, А.П. Обоснование целесообразности регулирования топливоподачи двигателя по давлению наддува с целью улучшения эксплуатационных показателей машинно-тракторного агрегата [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.П. Иншаков. – Челябинск, 1979. – 18 с.

71. Иншаков, А.П. Основы расчёта и испытания автотракторных двигателей [Текст]: учеб. пособие / А.П. Иншаков. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. – 212 с.

72. Иншаков, А.П. Особенности взаимосвязей показателей работы тракторного двигателя с газотурбинным наддувом в условиях сельскохозяйственной эксплуатации [Текст] / А.П. Иншаков // Вопросы механизации сельского хозяйства Нечернозёмной зоны РСФСР: межвуз. темат. сб. науч. тр. – Саранск, 1980. – С. 172-175.

73. Иншаков, А.П. Применение метода малых отклонений при теоретическом исследовании взаимосвязи показателей работы тракторного

двигателя с газотурбинным наддувом [Текст] / А.П. Иншаков. – М., 1988. – Деп. в ЦНИИТЭИ тракторосельхозмаш № 983 – ТС 88.

74. Иншаков, А.П. Основы теории, расчёта и моделирования процессов в автотракторных двигателях с использованием средств компьютерной графики [Текст]: учеб. пособие / А.П. Иншаков, М.Н. Ветчинников. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1999. – 112 с.

75. Иншаков, А.П. методические аспекты разработки универсальной системы контроля эксплуатационных качеств МТА [Текст] / А.П. Иншаков, С.В. Крючков // Международная научно-техническая конференция «Новые методы ремонта и восстановления деталей сельскохозяйственных машин»: Сб. материалов. – Саранск, 2001. – С. 129-136.

76. Иншаков, А.П. Особенности переходных процессов тракторного двигателя с газотурбинным наддувом в условиях сельскохозяйственной эксплуатации [Текст] / А.П. Иншаков, А.В. Резепов // Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара «Разработка и оптимизация динамических характеристик двигателей мобильных сельскохозяйственных комплексов». – Казань, 1991. – С. 23-24.

77. Калявин, В.П. Технические средства диагностирования [Текст] / В.П. Калявин, А.В. Мозгалевский. – Л.: Судостроение, 1984. – 210 с.

78. Киртбая, Ю.К. Резервы в использовании машинно-тракторного парка [Текст] / Ю.К. Киртбая. – М.: Колос, 1982. – 136 с.

79. Клюев, В.В. Технические средства диагностирования [Текст]: справочник / В.В. Клюев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.

80. Кокорев, Г.Д. Методология совершенствования системы технической эксплуатации мобильной техники в сельском хозяйстве [Текст]: моногр. / Г.Д. Кокорев. – Рязань: Изд-во «ФГБОУ ВПО РГАТУ», 2013. – 239 с.

81. Колемаев, В.А. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / В.А. Колемаев, О.В. Староверов, В.Б. Турундаевский. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.

82. Колесник, П.А. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей [Текст] / П.А. Колесник, А.А. Шейнин. – М.: Транспорт, 1985. – 325 с.

83. Колчин, А.В. Новые средства и методы диагностирования автотракторных двигателей [Текст] / А.В. Колчин, Ю.К. Бобков. – М.: Колос, 1982. – 110 с.

84. Колчин, А.В. Технологическое руководство по контролю и регулировке тракторных и комбайновых дизелей при эксплуатации [Текст] / А.В. Колчин, Б.Ш., Каргиев Д.В. Доронин. – М.: ФГНУ «Росинформротех», 2005. – 136 с.

85. Колчин, А.В. Технологическое руководство по контролю и регулировке дымности и токсичности отработавших газов дизелей тракторов и

самоходных машин (сельскохозяйственных, дорожно-строительных и др.) [Текст] / А.В. Колчин [и др.]. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 84 с.

86. Концепция развития технического сервиса в АПК России на период до 2010 года [Текст]. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2004. – 200 с.

87. Корн, Г.К. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г.К. Корн, Т.К. Корн. – М.: Наука, 1984. – 831 с.

88. Коровин, А.И. Диагностирование автомобильных дизельных двигателей по амплитудным параметрам колебаний давления отработавших газов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / А.И. Коровин. – Харьков: МАДИ, 1983. – 21 с.

89. Костин, А.К. Теплонапряжённость двигателей внутреннего сгорания [Текст]: справочное пособие / А.К. Костин, В.В. Ларионов, Л.И. Михайлов. – Л.: Машиностроение Ленингр. Отд-ние, 1979. – 222 с.

90. Костин, А.К. Работа дизелей в условиях эксплуатации [Текст] / А.К. Костин, Б.П. Пугачев, Ю.Ю. Кочинев. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 284 с.

91. Краскевич, В.Е. Численные методы в инженерных исследованиях [Текст] / В.Е. Краскевич, К.Х. Зеленский, В.И. Гречко. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 263 с.

92. Кувшинов, А.Н. Комплексная схема системы диагностирования турбокомпрессоров тракторных дизелей [Текст] / А.Н. Кувшинов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 1. – С. 49 – 50.

93. Кузнецов, Е.С. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст] / Е.С. Кузнецов [и др.]. – М.: Транспорт, 1991. – 413 с.

94. Кузнецов, П.И. Последовательное обучение систем диагностики [Текст] / П.И. Кузнецов, Л.А. Пчелинцев. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 112 с.

95. Курбаков И.И. Исследование показателей работы турбокомпрессора ТКР 6.1 [Текст] / И.И. Курбаков, О. Ф. Корнаухов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвуз. сб. науч. тр. / редкол.: А.В. Котин [и др.]. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 144 – 145.

96. Курбаков, И.И. Исследование показателей двигателя при нарушении воздухоподачи [Текст] / И.И. Курбаков // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : межвуз. сб. науч. тр. / редкол.: А.В. Котин [и др.]. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 145 – 147.

97. Курбаков, И.И. Теоретическое обоснование предельного значения давления наддува для диагностирования турбокомпрессоров автотракторных двигателей [Текст] / И.И. Курбаков // Научное сопровождение инновационного развития агропромышленного комплекса: теория, практика, перспективы: материалы 65-й Междунар. науч.-практ. конф. 20-21 мая 2014 года. – Рязань: Издательство Рязанского государственного агротехнологического университета, 2014. – Ч.2. – 237 с. – С.125-130.

98. Лихачёв, В.С. Испытания тракторов [Текст] / В.С. Лихачёв. – М.: Машиностроение, 1974. – 282 с.

99. Левцев, А.П. Оценка и управление энергетическими процессами сельскохозяйственных агрегатов [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.П. Левцев. – Саранск: Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2005. – 35 с.

100. Лезин, П.П. Основы научных исследований использования сельскохозяйственной техники [Текст]: учебное пособие / П.П. Лезин. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1983. – 79 с.

101. Лянденбургский, В.В. Совершенствование встроенной системы диагностирования автомобилей КАМАЗ с использованием мониторинга технического состояния транспортных средств [Текст] / В.В. Лянденбургский, Ю.В. Родионов, Л.А. Рыбакова // Автотранспортное предприятие. – 2014. – № 1. – С. 51-54.

102. Лянденбургский, В.В. Совершенствование комплекса КАД300 для диагностирования двигателей автомобилей [Текст]: монография / В.В. Лянденбургский. – Пенза: ПГУАС, 2012.

103. Лянденбургский, В.В. Программа поиска неисправностей дизельных двигателей [Текст] / В.В. Лянденбургский, А.И. Тарасов, С.А. Кривобок // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 8. – С. 17-20.

104. Лянденбургский, В.В. Программа поиска неисправностей транспортных средств [Текст] / В.В. Лянденбургский, А.И. Тарасов, А.В. Федосков, С.А. Кривобок // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 8. – С. 23.

105. Лянденбургский, В.В. Динамичная система технического обслуживания автомобилей [Текст] / В.В. Лянденбургский, А.В. Федосков, П.А. Мнекин // Грузовик. – 2012. – № 8. – С. 16-19.

106. Макс, Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях [Текст]: в 2 х т.: пер с франц. / Ж. Макс. – Мир, 1983. – Т.2. – 256 с.

107. Марушкин, Ю.А. Анализ методов и средств диагностирования турбокомпрессоров ДВС [Текст] / Ю.А. Марушкин, В.В. Власкин, Е.Брейкин // Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем: материалы Всерос. науч.-техн. конф., 19-23 окт. 2009 г. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. – 560 с.

108. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. [Текст] / С.В. Мельников, В.Р. Алешин, Е.М. Рощин. – Л.: Колос, 1980. 168 с.

109. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, новой техники, изобретений и рационализаторских предложений [Текст]. – М.: ВАСХНИЛ, 1980. – 116 с.

110. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники [Текст]. – М.: Министерство сельского хозяйства и продовольствия Российской Федерации. Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, 1998. – 220 с.
111. Методы и средства диагностирования сельскохозяйственной техники [Текст]. – М.: АгроНИИТЭИИТО, 1989. – С.7-15.
112. Миленский, В.С. Оценка ресурсов деталей в зависимости от их сменяемости в эксплуатации [Текст] / В.С. Миленский, Т.А. Шаровар // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1986. – Вып.29.
113. Михлин В.М. Прогнозирование технического состояния машин [Текст]. – М.: Колос, 1976. – С.106-110.
114. Михлин, В.М. Методические указания по прогнозированию технического состояния машин [Текст] / В.М. Михлин, А.А. Сельцер. – М.: Колос, 1972. – 17 с.
115. Михлин, В.М. Управление надежностью сельскохозяйственной техники [Текст] / В.М. Михлин. – М.: Колос, 1984. – 333 с.
116. Мозголевский, А.В. Техническая диагностика [Текст] / А.В. Мозголевский, Д.В. Гаскаров. – М.: Высшая школа, 1975. – 207 с.
117. Морозов, А.Х. Техническая диагностика в сельском хозяйстве [Текст] / А.Х. Морозов. – М.: Колос, 1979. – 207 с.
118. Надежность и эффективность в технике [Текст] / А.В. Авдуевский [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 223 с.
119. Налимов, В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов [Текст] / В.В. Налимов, Е.А. Чернова. – М.: Наука, 1965.
120. Неговора, А.В. Улучшение эксплуатационных показателей авто-тракторных дизелей совершенствованием конструкции и технологии диагностирования топливоподающей системы [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук/ А.В. Неговора. – СПб., 2004. – 32 с.
121. Неговора, А.В. Топливная аппаратура автотракторных дизелей [Текст]: учеб.-практ. пособие / А.В. Неговора. – Уфа: Изд-во ООО «Башдизель», 2006. – 150 с.
122. Никитин, Е.А. Диагностирование дизелей [Текст] / Е.А. Никитин, Л.В. Станиславский. – М.: Машиностроение, 1987. – 318 с.
123. Николаенко, А.В. Теория, конструкция и расчет автотракторных двигателей [Текст] / А.В. Николаенко. – М.: Колос, 1984. – 335 с.
124. Новиков, Г.В. Бортовые компьютерные системы информационной автоматики на зарубежных тракторах [Текст] / Г.В. Новиков // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1991. – № 5. – С. 47.

125. Новиков, Г.В. Новое поколение приборов и средств электронной автоматизации фирмы RDS Technology [Текст] / Г.В. Новиков // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1991. № 8. – С. 49.

126. Новицкий, Е.В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / Е.В. Новицкий, И.А. Зограф. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

127. Новиченко, А.Н. Повышение безотказности техники средствами диагностирования [Текст] / А.Н. Новиченко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2006. – №10.

128. Ополоник, Т.И. Эффективность диагностирования тракторов [Текст] / Т.И. Ополоник. – М.: РОСАГРОПРОМИЗДАТ, 1998. – С.4-17, 22-65, 109-110.

129. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей [Текст] / А.С. Орлин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.

130. Осис, Я.Я. Диагностирование на графмоделях [Текст] / Я.Я. Осис [и др.]. – М.: Транспорт, 1982. – 224 с.

131. ОСТ 70.0001.225-86. Техническая диагностика. Диагностирование тракторов и сельскохозяйственных машин. Общие требования [Текст]. – М.: ГОСНИТИ, 1986. – 15 с.

132. Пархоменко, Е.Е. Основы технической диагностики [Текст] / Е.Е. Пархоменко. – М.: Энергоиздат, 1985. – 265 с.

133. Пат. 145761 Российская Федерация, МПК G01P3/00. Устройство для измерения частоты вращения вала турбокомпрессора [Текст] / А.П. Иншаков, И.И. Курбаков, А.Н. Кувшинов, О.Ф. Корнаухов, патентообладатель ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева». – № 2013157453 ; заявл. 24.12.2013 ; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 6. – 8 с.: ил.

134. Патрахальцев, Н.Н. Форсирование двигателей внутреннего сгорания наддувом [Текст] / Н.Н. Патрахальцев, А.А. Севастенко. – М.: Легион – Автодата, 2007. – 176 с.

135. Положение о диагностировании машин в РАПО [Текст]. – М.: ГОСНИТИ, 1986. – 24 с.

136. Положение о диагностировании машин [Текст]. – М.: ГОСНИТИ, 1988. – 72 с.

137. Принципы анализа и обработки диагностических сигналов [Текст] / методические рекомендации. Ч. 2. – Новосибирск, 1981. – 54 с.

138. Приборы и оборудование для государственных инспекций по надзору за техническим состоянием самоходных машин и других видов техники в Российской Федерации [Текст]: каталог. – М.: ФГНУ «Росинформротех», 2001. – 160 с.

139. Райков, И.Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания [Текст]: учебник для вузов / И.Я. Райков. – М.: Высшая школа, 1975. – 320 с.

140. Раппорт, Д.М. Использование температуры выхлопных газов в качестве параметра, характеризующего загрузку двигателя [Текст] / Д.М. Раппорт. – М.: ОНИИ-НАТИ, 1961. – 34 с.
141. Руководство по диагностированию тракторов [Текст]. – М.: ГОСНИТИ, 1984. – 106 с.
142. Савельев, А.П. Диагностирование тракторов по динамическому состоянию машинно-тракторных агрегатов [Текст] / А.П. Савельев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1993. – 220 с.
143. Савченко, О.Ф. Автоматизированные технологические комплексы экспертизы двигателей [Текст] / О.Ф. Савченко, И.П. Добролюбов, В.В. Альт, С.Н. Ольшевский / РАСХН. Сиб. отд-ние. СибФТИ. – Новосибирск, 2006. – 272 с.
144. Салмин, В.В. Топливные системы современных и перспективных двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.В. Салмин [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2006. – 252 с.
145. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011610457. Программа регистрации параметров функционирования мобильных энергетических средств [Текст] / А.П. Иншаков, С.В. Крючков, А.Н. Кувшинов, С.С. Родионов; заявка № 2010616311 от 15.10.2010. Зарег. 11.01.2011.
146. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013615096. Мотор-тестер диагностики систем наддува двигателей внутреннего сгорания [Текст] / А.П. Иншаков, В.В. Кузнецов, А.Н. Кувшинов; заявка № 2013612573 от 01.04.2013. Зарег. 28.05.2013.
147. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013617233. Система исследования режимов работы турбокомпрессора [Текст] / В.В. Кузнецов, А.Н. Кувшинов; заявка № 2013612570 от 01.04.2013. Зарег. 06.08.2013.
148. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014616619. Программа определения технического состояния турбокомпрессора [Текст] / А.П. Иншаков, И.И. Курбаков, А.Н. Кувшинов, М.Н. Ветчинников; заявка № 2014614084 от 05.05.2014. Зарег. 30.06.2014.
149. Селиванов, А.И. Теоретические основы ремонта и основы надежности сельскохозяйственной техники [Текст] / А.И. Селиванов, Ю.Н. Артемьев. – М.: «Колос», 1978. – 248 с.
150. Селиванов, М.Н. Качество измерений [Текст]: метрологическая справочная книга / М.Н. Селиванов, А.Э., Фридман Ж.Ф. Кудряшова. – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.
151. Сельцер, А.А. Обнаружение и устранение неисправностей тракторов [Текст]: справочник / А.А. Сельцер. – М.: Агропромиздат, 1987. – 271 с.

152. Сельскохозяйственные тракторы. Технические и эксплуатационные характеристики [Текст] / под ред. Н.А. Щельцына. – М.: НП «Гильдия «АКП-ПРЕСС», 2007. – 144 с.
153. Сергеев, А.Г. Точность и достоверность диагностики автомобиля [Текст] / А.Г. Сергеев. – М.: Транспорт, 1980. – 188 с.
154. Симсон, А.Э. Турбонаддув высокооборотных дизелей [Текст] / А.Э. Симсон. – М.: Машиностроение, 1976. – 390 с.
155. Скибневский, К.Ю. Выбор диагностических параметров [Текст] / К.Ю. Скибневский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – №1. – С. 12-14.
156. Скибневский, К.Ю. Техническая диагностика тракторов и зерноуборочных комбайнов [Текст] / К.Ю. Скибневский [и др.]. – М.: Колос, 1978. – 287 с.
157. Скибневский, К.Ю. Методические указания по оптимизации алгоритмов диагностирования [Текст] / К.Ю. Скибневский. – М.: ГОСНИТИ, 1977. – 43 с.
158. Скибневский, К.Ю. Принципы оптимизации номенклатуры структурных параметров и диагностической информации [Текст] / К.Ю. Скибневский // Диагностирование сельскохозяйственной техники: науч. тр. – М.: ГОСНИТИ, 1985. – Т. 75. – С. 90-102.
159. Скибневский, К.Ю. Средства и методы диагностирования тракторов [Текст] / К.Ю. Скибневский. – М.: Колос, 1978. – 80 с.
160. Скибневский, К.Ю. Методология и комплекс средств диагностирования сельскохозяйственных тракторов при техническом обслуживании [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / К.Ю. Скибневский. – Л.: ГОСНИТИ, 1986. – 302 с.
161. Смирнов, С.В. Улучшение эксплуатационных показателей автотракторных дизелей путем совершенствования параметров системы наддува [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.В. Смирнов. – Пушкин, 2007. – 18 с.
162. Станиславский, Л.В. Техническое диагностирование дизелей [Текст] / Л.В. Станиславский. – Киев: Высшая школа, 1983. – 136 с.
163. Стефановский, Б.С. Испытание двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Б.С. Стефановский [и др.]. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.
164. Табашников, А.Т. Обработка результатов испытаний и научных исследований [Текст] / А.Т. Табашников. – Новокубанск: ФГНУ «РосНИИТиМ», 2006. – 173 с.
165. Тенденции развития сельскохозяйственной техники за рубежом (По материалам Международной выставки «SIMA-2007») [Текст]: Науч. ан. обзор. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2007. – 308 с.

166. Терских И.Е. Функциональная диагностика машинно-тракторных агрегатов [Текст] / И.Е. Терских. – Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 1987. – 312 с.

167. Успенский, И.А. Разработка теоретических положений по распознаванию класса технического состояния техники [Текст] / И.А. Успенский, Г.Д. Кокорев, И.Н. Николотов, С.Н. Гусаров // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств: сб. материалов XV Международ. науч.-практ. конф., посвященной памяти профессора Игоря Николаевича Арина / под общ. ред. А.Г. Кириллова. – 2013. – С. 110-113.

168. Успенский, И.А. Место и роль диагностирования в системе технической эксплуатации мобильного транспорта в сельском хозяйстве [Текст] / И.А. Успенский, Г.Д. Кокорев, С.Н. Гусаров // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования: сб. науч. тр. Международ. науч.-практ. конф. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. – СПб., 2013. – С. 333-336.

169. Фирсов, В.В. Планирование эксперимента при создании сельскохозяйственной техники [Текст] / В.В. Фирсов. – М.: Изд-во «ИНФРА-М», 1999. – 127 с.

170. Харазов, А.М. Диагностическое обеспечение технического обслуживания и ремонта автомобилей [Текст] / А.М. Харазов. – М.: Высшая школа, 1990. – 208 с.

171. Харазов, А.М. Диагностика легковых автомобилей на станциях технического обслуживания [Текст] / А.М. Харазов, Е.И. Кривенко. – М.: Высшая школа. 1987. – 272 с.

172. Черноиванов, В.И. Руководство по техническому диагностированию при техническом обслуживании, ремонте тракторов и сельскохозяйственных машин [Текст] / В.И. Черноиванов [и др.]. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2001. – 249 с.

173. Черноиванов, В.И. Стратегия развития технического сервиса в АПК [Текст] / В.И. Черноиванов // Техника в сельском хозяйстве. – 2002. – №2. – С. 33-35.

174. Черноиванов, В.И. Интеллектуальная сельскохозяйственная техника [Текст] / В.И. Черноиванов, А.А. Ежевский, В.Ф. Федоренко. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. – 124 с.

175. Шипилевский, Г.Б. Концепция автоматизации контроля и управления тракторами в современных условиях [Текст] / Г.Б. Шипилевский // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Автоматизация производственных процессов в сельском хозяйстве». Углич, 13-15 марта 1995. – М.: Изд-во ВИМ, С. 52-55.

176. Юдин, М.И. Ремонт машин в агропромышленном комплексе [Текст] / М.И. Юдин [и др.]; под ред. д.т.н., проф. М.И. Юдина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Краснодар: КГАУ, 2000. – 688 с.

177. Юлдашев, А.К. Динамика рабочих процессов двигателя машинно-тракторных агрегатов [Текст] / А.К. Юлдашев. – Казань: Татарское кн. изд-во, 1980 – 142 с.

178. Юлдашев, А.К. Стенды для исследования двигателей при неустановившихся нагрузках [Текст] / А.К. Юлдашев, И.Н. Хайрутдинов. – Казань: Изд-во «ФЭН», 2002 – 228 с.

179. Cillissen M. Introduction of a new test instrumentation system for performance tests on motor vehicles. Braking Road Veh. Conf. Longborough, 22-24 March, 1983, London, 1983.

180. Elektronik im traktor // Agrartechnik international. – 1984. – Bd. 63. – № 12. – P. 8-11.

181. George R. Cooper, Clare D. McGillem. Probabilistic Methods of Signal and System Analysis. – Chicago, 1986. – P. 213.

182. Wang Z. Fast algorithms for the discrete transform and for the discrete fourier transform. IEEE Trans. Acoust., Speesh and Signal Process. 1984. Vol. 32, N 4. P. 803 – 816.

183. Zinner K. Aufladung vor Verbrennungsmotoren. Berlin, Heidelberg, NEW Vork, 1975.

184. A.D. Edgar and S.C. Lee, «FOCUS Microcomputer Number System» Commun. ACM, vol. 22, p. 166, 1979. – 354 s.

185. Adorno T.W. Erziehung zur Miindigkeit – 13.Aufl. –Frankfurt [Main] : Suhrkamp, 1991. – 147 s.

186. Brase K. Philosophie und Erziehung. – Frankfurt am Main : Peter Lang, 1976. – Bern : Herbert Lang. – 1976. –S. 93.

187. C.W. Clenshaw and F.W.J. Olver, «Beyond Floating Point, J. ACM, volL 31, p. 319, April, 1984. – 189 s.

188. Erziehungswissenschaft und Erziehungsforschung//Schaller K. (Hg.). Hamburg, 1968. – S.204Portner D., Schulz G., Driftmann H., Wullich P. Grundlagen der Allgemeinen Wehrpadagogik. – Regensburg, Wallhalla u. Praetoria, 1977. – 442 s.

189. H. Henkel, «Improved Accuracy for the Logarithmic Number System,» IEEE Trans, on Acoust., Speech, and Signal Proc., vol. ASSP-37, p. 301, 1989. – 412 s.

190. Lindgren M. Multiplexed vehicle electronics tutorial / M. Lindgren. – Mecel. – 1995. – 123 pp.

191. Lang J. On the design of a special-purpose digital control processor / J. Lang // IEEE Transactions on automatic of control. – 1987. – №3. – p. 195 – 201.

192. Leland W. E. On the self-similar nature of Internet traffic (Extended Version) / W. E. Leland, M.S. Taggu // IEEE/ACM Transactions on Networking. – №2. – 1994. – p 45 – 48.
193. M.L. Frey and F.J. Taylor, «A Table Reduction Technique for Logarithmically Architected Digital Filters,» IEEE Trans, on Acoust., Speech, and Signal Proc., vol. ASSP-33, 1985, p. 718.
194. Ryn B. Point process models for self-similar Network Traffic, with applications / B. Ryn and S. Lowen // Stochastic Models. – № 14. – 1998. – p. 142 – 196.
195. T. Chen, «Maximal Redundancy Signed Digit Systems» Proceedings of the 7th Symposium on Computer Arithmetic, p. 296-300, 1985. – 450 s.
196. Relex Visual Reliability Software. Reference Manual. Relex Software Corporation, USA, 1999, 470 p.
197. Relex Visual Reliability Software. Tutorial Manual. Relex Software Corporation, USA, 2001, 66 p.
198. Romeu J. L. Statistical Analysis of Reliability Data, Part 3: On Statistical Modeling of Reliability Data. Journal of the RAC, Fourth Quarter, 2001, pp.1-5.
199. Russel S. J., Norvig P. Artificial Intelligence. A Modern Approach. Prentice-Hall International, Inc., 1995, 932 p.
200. Tang D., Hecht M., Rosin A., Handal J. Experience in Using MEADep. Proceedings of the 1999 Annual Reliability and Maintainability Symposium, Washington DC, January 18-21, 1999.
201. Qiong L. On the long-range dependence of packet round-trip delays in Internet / L. Qiong, David L., Mills. // Processings of IEEE ICC 98. – №2. – 1998. – 232 pp.
202. Ronald K. Jurgen Automotive electronics handbook / K. Jurgen Ronald. – In: McGraw-Hill. – 1999. – 364 pp.
203. Ryn B. Point process models for self-similar Network Traffic, with applications / B. Ryn and S. Lowen // Stochastic Models. – № 14. – 1998. – p. 142 – 146.
204. The component object model specification. – Draft version 0.9 Microsoft. – 1995.

Приложение 1

Листинг программы диагностирования турбокомпрессора

2014-06-24 20-32-10 "Д-245-35"

Режим: #1 : "RPM=2200, Пк=1.60 ";

Назв.: "Коэфф Изб Возд задан"

www.diesel-rk.bmstu.ru

Топливо: Diesel No. 2

```
----- МОЩНОСТНЫЕ И ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ -----
2200.0      - n          - Частота вращения коленчатого вала, [1/мин]
77.572     - Ne         - Мощность, [кВт]
8.9046     - Pe         - Среднее эффективное давление, [бар]
336.73     - Me         - Крутящий момент, [Нм]
0.06690    - qc         - Цикловая подача топлива, [г]
0.22767    - ge         - Удельный эффект. расход топлива, [кг/(кВт*ч)]
0.37206    - Eta_e      - Эффективный КПД
10.770     - Pi         - Среднее индикаторное давление, [бар]
0.45001    - Eta_i      - Индикаторный КПД
1.3816     - Pтр        - Давление трения, [бар]
0.82679    - Eta_mех    - Механический КПД

----- ПАРАМЕТРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ -----
1.0000     - Po*        - Давление заторм. потока, [бар]
293.00     - To*        - Температура заторможенного потока, [K]
1.0400     - Po_т       - Статическое давление за турбиной, [бар]
0.98000    - Po_вх*     - Давление заторм. потока за фильтром, [бар]

----- НАДДУВ И ГАЗООБМЕН -----
1.5680     - Pк         - Давление перед впускным коллектором, [бар]
356.32     - Tk         - Температура перед впускным коллектором, [K]
0.12923    - Gair       - Расход воздуха (+EGR) через цилиндры
двиг., [кг/с]
0.42255    - КПД_тк     - КПД агрегата наддува
1.6554     - Pt*        - Среднее давление перед турбиной, [бар]
792.94     - Tt*        - Средняя температура перед турбиной, [K]
0.13276    - Ggas       - Расход О.Г. через цилиндры двиг., [кг/с]
1.8176     - Alfa_sum   - Коэфф. избытка воздуха суммарный
-0.48381   - Pнх        - Среднее давление насосных ходов, [бар]
0.98507    - Eta_v      - Коэффициент наполнения
0.03762    - Gamma_r    - Коэффициент остаточных газов
0.98251    - Fi         - Коэффициент продувки
0.19134    - G_забр.%  - % заброса О.Г. во впускной коллектор
0.84301    - G_утеч.%  - % утечек через поршневые кольца

----- ВПУСКНОЙ КОЛЛЕКТОР -----
1.5423     - Ps         - Среднее давление во впуск. коллект., [бар]
361.53     - Ts         - Средн. температ. во впуск. коллект., [K]
369.65     - Tws        - Средняя температура стенки вп. колл., [K]
117.38     - Alfa_ws    - Коэфф. теплоотдачи во вп. колл., [Вт/(м2*K)]
60.000     - Alfa_wsc   - Коэфф. теплоотд. в клап.канале, [Вт/(м2*K)]

----- ВЫПУСКНОЙ КОЛЛЕКТОР -----
1.6339     - Pr         - Среднее статическое давление О.Г., [бар]
790.34     - Tr         - Средняя статическая температура О.Г., [K]
85.335     - Wr         - Средняя скорость газа, [м/с]
20.805     - Sh         - Число Струхаля: Sh=a*Tau/L (д.б. Sh > 8)
732.23     - Twr        - Средняя температура стенки вып. колл., [K]
301.68     - Alfa_wr    - Коэфф. теплоотдачи в вып. колл., [Вт/(м2*K)]
619.76     - Alfa_wcr   - Коэфф. теплоотд. в клап.канале, [Вт/(м2*K)]

----- СГОРАНИЕ -----
```

1.8500 - Alfa - Коэффициент избытка воздуха при сгорании
110.51 - Pz - Максимальное давление цикла, [бар]
1972.1 - Tz - Максимальная температура цикла, [К]
6.0000 - Fi_pz - Угол максимального давления, [град. за ВМТ.]
17.000 - Fi_tz - Угол максималн. температуры, [град. за ВМТ.]
5.6950 - dP/dFi - Макс. скор. нарастания давл., [бар/град]
Впрыск: Custom Fuel Injection System
517.54 - P_впр.max- Макс. давление впрыска, [бар]
20.665 - d_32 - Средний диаметр капель, [мкм]
20.000 - Teta_оп - Опережение впрыска / зажигания, [град.до ВМТ]
31.438 - Fi_впр - Продолжительность топливоподачи, [град]
7.0900 - Fi_задер - Период задержки воспламен. в цилиндре, [град]
0.09355 - Sig_и_здр- Доля топлива, испаривш. за период задержки
67.000 - Fi_горен - Продолжительность сгорания, [град.п.к.в.]
3.1117 - N_вмт - Вихревое число (отношение) в КС в ВМТ
0.74200 - N_нмт - Вихревое число в цилиндре в начале сжатия
21.730 - W_swirl - Макс. скорость вихря [м/с] в КС на радиусе R=

30

----- ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ -----
2.1357 - Hartridge- Эмиссия дыма по шкале Хартриджа
0.23391 - Bosch - Эмиссия дыма по шкале Бош
0.05085 - K,m-1 - Коэфф. абсол. светопоглощения ОГ по ЕЭК, [1/м]
0.03509 - PM - Эмиссия твердых частиц [г/(кВт*ч)]
733.59 - CO2 - Эмиссия диоксида углерода, [г/(кВт*ч)]
1770.6 - NOx,ppm - Концентр. влажных NOx, [1/млн, (ppm)]
11.793 - NO,г/кВтч - Эмиссия NOx приведен. к NO, [г/(кВт*ч)]
(Zeldovich)
1.8017 - SE - Комплекс суммарной эмиссии NOx и PM
0.0000 - SO2 - Эмиссия SO2, [г/кВтч]

----- ВНУТРИЦИЛИНДРОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ -----
1.9036 - Pa - Давление начала сжатия, [бар]
416.28 - Ta - Температура начала сжатия, [К]
65.382 - Pc - Давление конца сжатия, [бар]
1050.8 - Tc - Температура конца сжатия, [К]
5.3271 - Pb - Давление начала выпуска, [бар]
1062.0 - Tb - Температура начала выпуска, [К]

----- ПАРАМЕТРЫ ТЕПЛООБМЕНА ЦИЛИНДРА -----
1185.3 - T_ср - Средняя эквивалентная температура цикла, [К]
443.07 - Alfa_w - Ср. коэфф. теплоотд. от газа к стен, [Вт/м2/К]
402.63 - Tw_поршн - Средн. температура огневого днища поршня, [К]
428.00 - Tw_втулк - Средн. температ. огневой поверхн. втулки, [К]
473.69 - Tw_крышк - Средн. температ. огневой поверхн. крышки, [К]
387.05 - Tw_охл - Средн. температура со стороны охлаждения
крышк крышки цилиндра, [К]
399.39 - Tкип. - Температ.кипения в сист. жид. охлаждения, [К]
11686. - Alf_w_охл- Средн. коэфф. теплоотдачи [Вт/(м2*К)] от
стенки крышки цилиндра к охлад. среде.
2996.4 - q_крышки - Тепловой поток в крышку цилиндра, [Дж/с]
3295.6 - q_поршня - Тепловой поток в поршень, [Дж/с]
2178.5 - q_цилинд - Тепловой поток во втулку цилиндра, [Дж/с]

----- ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС -----
15.100 - Степ.сжат- Степень сжатия (для ПДП при обоих поршнях в ВМТ)
5.0000 - i_сопел - Число сопловых отверстий форсунки
0.22500 - d_сопел - Диаметр сопловых отверстий форсунки, [мм]
30.000 - Fi_впр.х - Продолжит. впрыска для зад. хар. впрыска, [град]
0.0000 - qc_x - Цикл. порц. топл. для заданной хар. впрыска, [г]
52.000 - Нач.вып - Начало выпуска, [град. до НМТ] (ВПуск. вала)
18.000 - Кон.вып - Конец выпуска, [град. за ХМТ] (ВПуск. вала)
16.000 - Нач.впуск- Начало впуска, [град. до ХМТ] (ВПуск. вала)
42.000 - Кон.впуск- Конец впуска, [град. за НМТ] (ВПуск. вала)

```

----- ПАРАМЕТРЫ КОМПРЕССОРА ступени высокого давления -----
8.2242      - N_квд      - Мощность компрессора ВД, [кВт]
0.66500    - КПД_квд    - Адиабатный КПД компрессора ВД
0.12923    - G_квд      - Расход воздуха через компрессор ВД, [кг/с]
2.2572     - Gпр_квд    - Расход воздуха приведенный через КВД
0.13076    - Gкор_квд   - Расход воздуха через КВД скорректиров., [кг/с]
1.6000     - П_квд      - Степень повышения давления в компрессоре ВД
0.98000    - Ро_квд     - Полное давление на входе в КВД, [бар]
293.00     - То_квд     - Температура торможения на входе в КВД, [К]
1.5680     - Рк*_квд    - Давление наддува за КВД, [бар]
356.32     - Тк*_квд    - Температура наддувочного воздуха за КВД, [К]

```

```

----- ПАРАМЕТРЫ ТУРБИНЫ ступени высокого давления -----
8.2243     - N_твд      - Мощность ТВД с учетом мех. КПД, [кВт]
0.69735    - КПД_твд    - Внутренний КПД турбины ВД
0.91000    - КПДм_твд   - Механический КПД турбины ВД
0.13276    - G_твд      - Расход газа через ТВД, [кг/с]
2.2582     - Gпр_твд    - Расход газа через ТВД приведенный
1.5928     - П_твд      - Степень понижения давления в турбине ВД
9.0014     - В_твд      - Относительная работа ТВД
1.6554     - Рт*_твд    - Полное давление перед турбиной ВД, [бар]
792.94     - Тт*_твд    - Температура торможения на входе в ТВД, [К]
1.0393     - Ро_твд     - Противодавление за турбиной ВД, [бар]
731.58     - То_твд     - Температура газа за турбиной ВД, [К]

```

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОПЛИВА ПО ЗОНАМ НА МОМЕНТ ОКОНЧАНИЯ РАЗВИТИЯ СТРУЙ

```

=====
Н| угол в | угол с | поверхн. | _____доли топлива в характерных зонах %_____
с| плане | осью ц | контакта | Оболоч. Ядро_V Порш. Перекр Крышка Цил.зер

```

```

1|  0.0 | 66.5 | кам.в порш| 14.25  0.03  5.72  0.95  0.00  0.00
2| 72.0 | 69.0 | кам.в порш| 14.34  0.03  5.63  0.65  0.00  0.00
3| 144.0 | 71.5 | кам.в порш| 14.65  0.03  5.32  0.11  0.00  0.00
4| -144.0 | 71.5 | кам.в порш| 14.71  0.03  5.26  0.03  0.00  0.00
5| -72.0 | 69.0 | кам.в порш| 14.33  0.03  5.64  0.54  0.00  0.00

```

```

-----
Сумма по всем струям % 99. | 65.94  10.01  23.13  0.29  0.00  0.00
=====

```

```

Константы испарения би | 6006  3081  437  369  371  15
=====

```

Прим.: Перекр. - часть топлива ядра пристеночного потока, набегающая на пристеночные потоки от соседних струй.

```

Вихревое | (Надпорш. зазор, мм. 1.00) | Оптим. | Геометрическое - 2.29
число Н | Для КС в конце сжатия 3.11 | для КС | Уточн.Разлейцевым- 2.29

```

Версии модулей: Ядро 24.09.08; РК-модель 25.09.08; NOx-модель 5.06.08

Приложение 2

Листинг программы встроенного диагностирования

```
#include <mega32.h>
#include <delay.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

unsigned char met,i;
unsigned char stroka=0;
unsigned int ADC_Bufer;
unsigned char DataBuffer[200]; // буфер на 200 точек на инд вив только
100 центр
unsigned char DataBuffer_rot[200]; // буфер на 200 точек для измерения
оборотов
unsigned char x_sinhr; // абсциса синхронизации
signed int rot; // обороты двигателя [об/мин]
eeprom unsigned char DataSave[8][100];
const unsigned char XX[100]={ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2,
4, 6, 8,11,13,15,17,23,27,28,
35,39,40,45,46,52,52,49,47,46,
43,41,41,38,35,35,35,35,37,37,
34,31,27,24,21,17,14,11, 7, 4,
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, //50..59
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 7,19,
16,11, 8, 6, 7, 8, 9,23,43,37,
26,12,15,25,23,17, 9,11,16,14,
9, 5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
const unsigned char NG[100]={ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
0, 0,23,52,27, 6,48,36,13,16,
20,13, 7,17,15,26, 8, 3, 5, 8,
6, 4, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, //50..59
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
eeprom unsigned char DataSave[8][100];
// нач свед о двигателе
unsigned char zona=1,narabotka;
```

```
unsigned char today[3]={0,0,11}; // day=0,month=0,year=11,
```

```
#include "text.h"
```

```
// кнопки
```

```
#define BUT_INFO 1
```

```
#define BUT_MENU 2
```

```
#define BUT_LEFT 3
```

```
#define BUT_RIGHT 4
```

```
#define BUT_ENTER 5
```

```
#define BUT_DOWN 6
```

```
#define BUT_UP 9
```

```
#define BUT_ESC 8
```

```
#define BUT_MEMORY 7
```

```
#define ADC_VREF_TYPE 0xE0
```

```
// АЦП
```

```
unsigned char read_adc(unsigned char adc_input)
```

```
{
```

```
ADMUX=adc_input | (ADC_VREF_TYPE & 0xff);
```

```
// Delay needed for the stabilization of the ADC input voltage
```

```
delay_us(10);
```

```
// Start the AD conversion
```

```
ADCSRA|=0x40;
```

```
// Wait for the AD conversion to complete
```

```
while ((ADCSRA & 0x10)==0);
```

```
ADCSRA|=0x10;
```

```
return ADCH;
```

```
}
```

```
//таймер выборки
```

```
interrupt [TIM2_OVF] void timer2_ovf_isr(void)
```

```
{
```

```
TCNT2=60;
```

```
//PORTC.5=1;
```

```
ADC_Bufer+=read_adc(0);
```

```
//PORTC.5=0;
```

```
TCNT0++;
```

```
}
```

```
#include "driver_mt12864.h"
```

```
unsigned char keypad(void){
```

```
byte data=0;
```

```

PORTA=0b11100000;
DDRA= 0b00100000;
if(PINA.2){data=3;}
if(PINA.3){data=4;}
if(PINA.4){data=7;}
DDRA= 0b01000000;
if(PINA.2){data=1;}
if(PINA.3){data=5;}
if(PINA.4){data=8;}
DDRA= 0b10000000;
if(PINA.2){data=2;}
if(PINA.3){data=6;}
if(PINA.4){data=9;}
return data;
}
void SaveMenu(byte dx){
    stroka=0;
    delay_ms(900);
    LCD_CLS();
    while(keypad()!=BUT_ENTER){
        if(keypad()==BUT_DOWN){stroka++;LCD_CLS();}
        if(keypad()==BUT_UP){stroka--;LCD_CLS();}
        if(stroka==255){stroka=0;}
        if(stroka==8){stroka=7;}
        for(i=0;i<8;i++){
            if(i==stroka){met=MET_NOT_OR;}else{met=MET_OR;}
            LCD_PUTSF(50,i*8,NameSave[i+2]); // N1..N8
        }
        if(keypad()==BUT_ESC){return;}
        delay_ms(200);
    }
    for(i=0;i<100;i++){DataSave[stroka][i]=DataBuffer[i+dx-10];} // сохранение
данных в память EEPROM
    LCD_CLS();
    LCD_PUTSF(10,24,"График Сохранен...");delay_ms(1000);
}
void WritingData(byte k){ // запись 200 точек
byte n=0;
    TCCR2=0x02; // с шагом 200мкс
    TIMSK=0x40;
    TCNT2=60;

```

```

while(n<200){
    if(keypad()==BUT_ESC){break;}
    ADC_Bufer=0;
    TCNT0=0;          // счет количества точек округления

    while (TCNT0<k){} // АЦП k-точек

    DataBuffer[n]=ADC_Bufer/k; // округления k-точек
    n++;
}
TIMSK=0;
}
void AutoAmplBufer(void){
byte Amax=0,data;
float k;
for(i=0;i<200;i++){
    data=DataBuffer[i];
    if(Amax<data){Amax=data;}
}
k=Amax/55;
if(k<1.0){k=1.0;}
for(i=0;i<200;i++){DataBuffer[i]=DataBuffer[i]/k;}
}
unsigned char BuferAnaliz(void){
byte x_up[5]={0,0,0,0,0};
byte x_down[5]={0,0,0,0,0};
unsigned int S[5]={0,0,0,0,0};
unsigned int Smax; // площадь большого всплеска (не менее)
byte x=10;
byte N=0; // кол-во всплесков
next_find:
while(DataBuffer[x]>0){ // поиск конца неполного всплеска
    x=x+1;
    if(x>=100){goto not_find;}
}

for(i=0;i<6;i++){ // убедится в окончании неполного
всплеска
    if(DataBuffer[x+i]>0){x+=i;
        if(x>=100){goto not_find;}
        goto next_find;
    }
}

```

```

    }
}
wait_st_vsp:
while(DataBuffer[x]==0){x++;           // дождаться начала всплеска
    if(x>=200){goto not_find;}
    }

for(i=0;i<6;i++){                     // убедится в начале всплеска
    if(DataBuffer[x+i]==0){x+=i;goto wait_st_vsp;}
}

// счет количества полных всплесков
x_up[N]=x;                             // запись абсцисы начала всплеска

wait_end_vsp:
while(DataBuffer[x]>0){x++;           // дождаться конца всплеска
    if(x>=200){goto not_find;}
}
for(i=0;i<6;i++){                     // убедится в конце всплеска
    if(DataBuffer[x+i]>0){x+=i;
        if(x>=200){goto not_find;}
        goto wait_end_vsp;
    }
}
x_down[N]=x;                           // запись абсцисы конца всплеска
N++;
if(N>4){goto not_find;}                // максимальное количество
анализируемых всплесков
goto wait_st_vsp;
not_find:
for (N=0;N<5;N++){
    for(i=x_up[N];i<x_down[N];i++){
        S[N]+=DataBuffer[i];          // вычисление площади всплеска
    }
}
Smax=0;
for (N=0;N<5;N++){                    // поиск максималного всплеска
    if(Smax<S[N]){Smax=S[N];}
}
Smax=Smax*0.7;                          // минимальная площадь большого
всплеска
for (N=0,i=0;N<5;N++){

```

```

        if(S[N]>=Smax){ // запись абсцис больших всплесков по
порядку
        x_up[i]=x_up[N];
        x_down[i]=x_down[N];
        i++; // счет больших всплесков
        }
        else{ // стирание абсцис маленьких всплесков
        x_up[N]=0;
        x_down[N]=0;

        }
    }
    // определения количества точек между этими всплесками
    // пересчет в обороты двигателя (1 всплеск на 2 оборота)
    x_sinhr=0;
    x_sinhr=x_up[0]; // если равно 0 то нет синхр.
    }
void Setka(void){
    LCD_LINE(9,63,110,63); // ось x
    LCD_LINE(9,63,9,8); // ось y
    LCD_PUTC(113,56,'t');
    LCD_PUTC(1,0,'P');
}
void DataToGrafik(byte st_x,byte from){
byte x,y,data_old,y_old=0,data;
    if(st_x==0){return;}
    st_x-=10; // ВЫВОДИТЬ на экран за 10 точек до начала точки синхронизации
    for (x=0;x<99;x++){
        switch(from){
            case 255: data=DataBuffer[x+st_x+1];data_old=DataBuffer[x+st_x];
break;// выводим со смещением dx из буфера
            case 0: data=XX[x+1];data_old=XX[x];break; // выводим идеальный
график XX
            case 1: data=NG[x+1];data_old=NG[x];break;
            default: data=DataSave[from-2][x+1];data_old=DataSave[from-2][x]; //
выводим из EEprom
        }
        if (data>55){data=55;}
        if (data_old>55){data_old=55;}
        y=63-data;
    }
}

```

```

    y_old=63-data_old;
    LCD_LINE(x+9,y_old,x+10,y);
    //LCD_PUT_PIXEL(x+10,y);
}
}
void Nalogenie(byte st_x){
signed char dx=11;
byte Num=0;
LCD_CLS();
delay_ms(500);
do{
    LCD_CLS();
    Setka();
    LCD_PUTSF(18,0,"Наложен график:");
    DataToGrafik(st_x+dx,255);
    LCD_PUTSF(106,0,NameSave[Num]);
    delay_ms(150);
    DataToGrafik(255,Num); // выводится тусклое
    if(keypad()==BUT_RIGHT){dx--;} //сдвинуть график влево
    if(keypad()==BUT_LEFT) {dx++;} //сдвинуть график вправо
    if(keypad()==BUT_UP) {Num++;} //сдвинуть график влево
    if(keypad()==BUT_DOWN) {Num--;} //сдвинуть график вправо
    if(Num>9){Num=9;}
    if(Num==255){Num=0;}
    delay_ms(150);
}while(keypad()!=BUT_ESC);
}
unsigned int Rotation(){ // измерение оборотов двигателя
byte i=0,x=0,x0=0,y_max=0,y;
byte x_max[2]={0,0};
byte y_max[2]={0,0};
WritingData(16);
while(DataBuffer[x]>0){ // поиск конца неполного всплеска
    x++;
    if(x>=200){return 0;}
}
while(DataBuffer[x]==0){x++; // дождаться начала всплеска
    if(x>=200){return 0;}
}
x0=x; // точка начала поиска
while(x<200){

```

```

    y=DataBuffer[x];
    if(y>ymax){ymax=y;} // поиск максимального значения
    x++;
}
if(y_max<16){rot=0;return rot;}
ymax=ymax*0.7;
x=x0;
while((x<200)&&(i<2)){ // поиск пиков
    y=DataBuffer[x];
    if (y>ymax){
        if(y>y_max[i]){y_max[i]=y;x_max[i]=x;} // поиск максимумов
    }
    if((y==0)&&(y_max[i]>y_max)){i++;}
    x++;
}
rot=x_max[1]-x_max[0];

//LCD_PUTDS(80,8, x_max[0],3);// временно
//LCD_PUTDS(80,16, x_max[1],3);// временно
//LCD_PUTDS(100,8, y_max[0],3);// временно
//LCD_PUTDS(100,16,y_max[1],3);// временно
rot=37500/rot;
if ((rot<300)||rot>6100){rot=0;}
return rot;
}
void DiagnXX(void) // диагностика топл. сист. на X.X.
byte st_x;
signed char dx=0;
LCD_CLS();
delay_ms(500);
do{
    Rotation();
    if(keypad()==BUT_ESC){return;}
    delay_ms(200);
    if(keypad()==BUT_ESC){return;}
    delay_ms(200);
    LCD_CLS();
    if(rot){
        LCD_PUTDS(65,0,rot,4); // вывод оборотов двигателя
        LCD_PUTSF(90,0,"об/мин");
    }
}

```

```

    }
    Setka();
    WritingData(1);          // запись данных с датчика в буфер
    BuferAnaliz();
    //AutoAmplBufer();      // автоматическая регулировка амплитуды
(K=0,2..1)
    DataToGrafik(x_sinhr,255);

                                // считка индикатора
} while(keypad()!=BUT_ENTER);
podmenudiagn:
LCD_CLS();
delay_ms(500);
do{
    if(keypad()==BUT_DOWN){stroka++;LCD_CLS(); }
    if(keypad()==BUT_UP){stroka--;LCD_CLS(); }
    if(stroka==255){stroka=0;}
    if(stroka==3){stroka=2;}
    for(i=0;i<3;i++){
        if(i==stroka){met=MET_NOT_OR;}else{met=MET_OR;}
        LCD_PUTSF(0,i*8,NameDiagn[i]);
    }
    if(keypad()==BUT_ESC){met=MET_OR;return;}
    delay_ms(200);
} while(keypad()!=BUT_ENTER);
if(stroka==0){LCD_CLS();} // продолжить анализ
if(stroka==1){Nalogenie(st_x);goto podmenudiagn;} // наложение
графика из EEPROM
if(stroka==2){SaveMenu(st_x);goto podmenudiagn;} // в меню
сохранения графика
}
void DiagnH(void){
    byte st_x;
    signed char dx=0;
    LCD_CLS();
    delay_ms(500);
    do{
        Rotation();
        //AutoAmplBufer();      // автоматическая регулировка амплитуды
(K=0,2..1)

```

```

        if(keypad()==BUT_ESC){return;}
    delay_ms(200);
    if(keypad()==BUT_ESC){return;}
    delay_ms(200);
    LCD_CLS(); // очистка индикатора
    if(rot){
        LCD_PUTSF(90,0,"об/мин");
        LCD_PUTDS(65,0,rot,4); // вывод оборотов двигателя
    }
    Setka();
    WritingData(5);          // запись данных с датчика в буфер
    //BuferAnaliz();
    DataToGrafik(11,255);
    }while(keypad()!=BUT_ENTER);
podmenudiagn:
LCD_CLS();
delay_ms(500);
do{
    if(keypad()==BUT_DOWN){stroka++;LCD_CLS(); }
    if(keypad()==BUT_UP){stroka--;LCD_CLS(); }
    if(stroka==255){stroka=0;}
    if(stroka==3){stroka=2;}
    for(i=0;i<3;i++){
        if(i==stroka){met=MET_NOT_OR;}else{met=MET_OR;}
        LCD_PUTSF(0,i*8,NameDiagn[i]);
    }
    if(keypad()==BUT_ESC){met=MET_OR;return;}
    delay_ms(400);
}while(keypad()!=BUT_ENTER);
if(stroka==0){LCD_CLS();while(1){}} // продолжить анализ
if(stroka==1){Nalogenie(st_x);goto podmenudiagn;} // наложение
графика из EEPROM
    if(stroka==2){SaveMenu(st_x);goto podmenudiagn;} // в меню
сохранения графика
}
byte Nachsvedodvig() { // начальные сведения о двигателе
byte param=0;
    LCD_CLS();
    delay_ms(500);
    do{
        met=MET_OR;

```

```

if(keypad()==BUT_RIGHT){param++;LCD_CLS();}
if(keypad()==BUT_LEFT){param--;LCD_CLS();}
if(param==255){param=0;}
if(param==4){param=3;}

if(keypad()==BUT_UP)
{if(param==3){zona++;}else{today[param]++;}LCD_CLS();}
if(keypad()==BUT_DOWN){if(param==3){zona--;}else{today[param]--;}LCD_CLS();}
if(today[0]==32){today[0]=0;}
if(today[0]==255){today[0]=31;}
if(today[1]==13){today[1]=1;}
if(today[1]==0){today[1]=12;}
if(today[2]>50){today[2]=11;}
if(today[2]<11){today[2]=50;}
if(zona==3){zona=0;}
if(zona==255){zona=2;}

LCD_PUTSF(6,0,"НАЧАЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ");
LCD_PUTSF(27,8,"О ДВИГАТЕЛЕ:");
LCD_LINE(10,17,118,17);
LCD_PUTSF(0,24,"Сегодня: 20 г.");
LCD_PUTSF(6,40,"Климатическая зона:");
if(param==0){met=MET_NOT_OR;}else{met=MET_OR;}
LCD_PUTDS(54,24,today[0],2);
if(param==1){met=MET_NOT_OR;}else{met=MET_OR;}
LCD_PUTDS(72,24,today[1],2);
if(param==2){met=MET_NOT_OR;}else{met=MET_OR;}
LCD_PUTDS(102,24,today[2],2);
if(param==3){met=MET_NOT_OR;}else{met=MET_OR;}
LCD_PUTSF(10,48,NameZona[zona]);
if(keypad()==BUT_ESC){return 0;}
delay_ms(300);
}while(keypad()!=BUT_ENTER);
LCD_CLS();
delay_ms(500);
do{
switch(keypad()){
case BUT_DOWN:
case BUT_UP:
case BUT_LEFT:

```

```

    case
if(narabotka){narabotka=0;}else{narabotka=1;}LCD_CLS();
    default:
    }
    met=MET_OR;
    LCD_PUTSF(3,0,"Наработка двигателя");
    LCD_PUTSF(0,8,"с начала эксплуатации");
    LCD_PUTSF(0,16,"(или кап. ремонта):");
    met=MET_NOT_OR;
    LCD_PUTSF(16,36,NameNarabotka[narabotka]);
    met=MET_OR;

    if(keypad()==BUT_ESC){return 0;}
    delay_ms(400);

}while(keypad()!=BUT_ENTER);
LCD_CLS();
LCD_PUTSF(8,16,"Начальные сведения");
LCD_PUTSF(16,32,"сохранены ...");
delay_ms(1500);
return 1;    // сведения были введены полностью
}
byte structura( byte n_str, byte pos_menu, flash char *text){
    int i; // № символа текста
    byte x=0;// № символа строки
    byte direct; //0-вниз 1-вверх направление движения по меню
    byte str=0; // активная строка меню
    byte page=0; // активная страница меню
    byte p; // перебираемая страница меню
    byte lcd_str; // выводимая строка индикатора
    float n=0;
    byte del=0;
    byte perv_raz=1;
    byte beg=0;
    if(pos_menu<8){str=pos_menu;}
    met=MET_FAST;
    LCD_CLS();
    delay_ms(600);
    while((keypad()!=BUT_ENTER)){
        p=0;
        lcd_str=0;

```

```

i=0;
while(1){
  x=0;beg=0;
  while(1){
    if (text[i]==0) {goto end_text;}
    if (text[i]=='/'){i++;goto end_stroka;} // / -переход на след.
строку
    if(p==page){
      if(str==lcd_str){ // активная строка
        if ((page*8+str)>=pos_menu){met=MET_FAST_NOT;}
        if (text[i]=='_'){beg=1; } //if(perv_raz){del=1;perv_raz=0;}
        if (text[i+(byte)n]=='/'){n=0;} //if(perv_raz){del=1;perv_raz=0;}
        }
        if (text[i]=='_'){i++;}
        if (beg){LCD_PUTC(x*6, lcd_str*8, text[i+(byte)n]);// вывод
бегущей строки
          // if ((n==1)&&()) {delay_ms(2000);perv_raz=0;} // задержка на
первом символе
          //if ((n==19)&&(perv_raz)) {delay_ms(3000);perv_raz=0;} //
задержка на последнем символе
        }
        else {LCD_PUTC(x*6, lcd_str*8, text[i]);} // вывод строки
        //if(n==3){perv_raz=1;}
        if (x>20){x=0;while(text[i]!='/'){i++;} i++; goto end_stroka;}
// выводим сколько влезит а индикатор
      }
      i++; x++;
    }
    end_stroka:
      met=MET_FAST;
      lcd_str++;if(lcd_str==8){lcd_str=0;p++;}
  }
  end_text:
  if(del){delay_ms(400);del=0;}
  if(n==0.3){delay_ms(800);} // задержка нач строки
  if(n==0){delay_ms(1000);}
  if((keypad()==BUT_DOWN)&&((page*8+str+1)<n_str)){
    str++;n=0;direct=0; // вниз по списку
    if(str==8){ // переход на следующую страницу

```

```

    str=0;page++;
    if(page==3){page=2;}
    LCD_CLS();
}
//del=1;
}
if(keypad()==BUT_UP){
    str--;n=0;direct=1;           // вверх по меню
    if(str==255){                 // переход на предыдущую страницу
        str=7;page--;
        if(page==255){page=0;str=0;}
        LCD_CLS();
    }
    //del=1;
}
delay_ms(50);
n+=0.3; // скорость бегущей строки
if(keypad()==BUT_ESC){return 255;} // 0- значит выход из подменю

while(((page*8+str)<pos_menu)&&(str!=7)){ // инерционное движение
ПО МЕНЮ
    if (direct){
        str--;
        if(str==255){str=7;page--;if(page==255){page=0;}}
    }
    else{
        str++;
        if(str==255){str=7;page++;if(page==4){page=3;}}
    }
    if(((page*8+str)==pos_menu)||((str==7))){LCD_CLS();}
}
}
return (page*8+str-pos_menu+1);           // ВХОД В ПОДМЕНЮ
}
void PoiskNeispr(){
byte n=0,ur1=0,ur2=0,ur3=0,ur4=0,ur5=0,ur6=0,ur7=0,ur8=0;
signed char len;
    if(!Nachsvododvig()){return;} // выйти если не введены нач сведения
//structura(24,20,test);
repit_A:

```

```

ur1=structura(8,1,A);
switch (ur1){
case 1: {
    repit_A1:
    ur2=structura(7,1,A1);
    switch (ur2){
    case 1: {
        repit_A11:
        ur3=structura(7,2,A11);
        switch (ur3){
        case 1: {
            repit_A111:
            ur4=structura(12,9,A111);
            switch (ur4){
            case 1: // как case 2
            case 2: {ur5=structura( 6, 7,A1111);goto repit_A111;}
            case 3: {
                repit_A1113:
                ur5=structura(14,12,A1113);
                switch (ur5){
                case 1: {
                    repit_A11131:
                    ur6=structura( 5, 2,A11131);
                    switch (ur6){
                    case 1:
                    case 2:
                    case 3: ur7=structura( 5, 2,A13); goto repit_A11131;
                    default:
                    }
                    goto repit_A1113;
                }
            }
            case 2: {
                repit_A11132:
                ur6=structura(15,12,A11132);
                switch (ur6){
                case 1: {
                    repit_A111321:
                    ur7=structura( 5, 2,A11131); goto repit_A11132;
                    switch (ur7){
                    case 1:
                    case 2:

```

```

        case 3: ur8=structura( 5, 2,A13); goto repit_A11321;
        default:
        }
        goto repit_A1132;
    }
case 2: ur7=structura( 4, 5,A11322);goto repit_A1132;
    case 3: {
        repit_A11323:
        ur7=structura( 5, 2,A1131);
        switch (ur7){
        case 1:
        case 2:
        case 3: ur8=structura( 5, 2,A13); goto repit_A11323;
        default:
        }
        goto repit_A1132;
    }
    default:
    }
    goto repit_A113;
}
default:
}
goto repit_A111;
}
default:
}
goto repit_A11;
}
case 2: {
    repit_A112:
    ur4=structura(18,15,A112);
    switch(ur4){
    case 1: {ur5=structura( 4, 4,A1121);goto repit_A112;}
    case 2: // как case 3
    case 3: {
        repit_A1123:
        ur5=structura(14,12,A1113);

```

```

switch(ur5){
case 1: // как case 2
case 2: {
    repit_A11232:
    ur6=structura(15,12,A11132);
    switch(ur6){
case 1: {ur7=structura( 5, 2,A13); goto repit_A11232;}
case 2: {ur7=structura( 4, 5,A111322);goto repit_A11232;}
case 3: {ur7=structura( 5, 2,A13); goto repit_A11232;}
default:
    }
    goto repit_A1123;
    }
default:
    }
goto repit_A112;
}
default:
}
goto repit_A11;
}
case 3: {
    repit_A113:
    ur4=structura(17,14,A113);
    switch(ur4){
case 1: {ur5=structura(14,12,A1113);goto repit_A113;}
case 2: {ur5=structura( 4, 4,A1132);goto repit_A113;}
case 3: {ur5=structura(14,12,A1113);goto repit_A113;}
default:
    }
    goto repit_A11;
}
case 4: {
    repit_A114:
    ur4=structura(18,15,A114);
    switch(ur4){
case 1: {ur5=structura( 4, 4,A1141);goto repit_A114;}
default:

```

```

        }
        goto repit_A11;
    }
    default:
    }
    goto repit_A1;
}
case 2: // как case3
case 3: {ur3=structura(6,2,A13);goto repit_A1;}
case 4: {ur3=structura(7,1,A14);goto repit_A1;}
case 5: {ur3=structura(6,3,A15);goto repit_A1;}
case 6: {
    repit_A16:
    ur3=structura(7,2,A16);
    switch (ur3){
    case 1: {ur4=structura(11,12,A161);goto repit_A16;}
    case 2: {ur4=structura(11,12,A162);goto repit_A16;}
    case 3: // как case 4
    case 4: {ur4=structura(14,15,A163);goto repit_A16;}
    default:
    }
    goto repit_A1;}
default:
}
goto repit_A;
}
case 2: {
    repit_A2:
    ur2=structura(6,1,A2);
    switch (ur2){
    case 1: {
        repit_A21:
        ur3=structura( 4, 1,A21);
        switch (ur3){
        case 1: // как case3
        case 2: // как case3
        case 3: {
            repit_A211:
            ur4=structura(20,17,A211);
            switch(ur4){

```

```

        case 1: // как case3
        case 2: // как case3
        case 3: ur5=structura(6,6,A2111);goto repit_A211;
        default:
        }
        goto repit_A21;
    }
    default:
    }
    goto repit_A2;
}
case 2: {
    repit_A22:
    ur3=structura( 4, 1,A22);
    switch (ur3){
    case 1: // как case 2
    case 2: ur4=structura( 7, 2,A16); goto repit_A22;
    case 3: ur4=structura(13,10,A223);goto repit_A22;
    default:
    }
    goto repit_A2;
}
case 3: {
    repit_A23:
    ur3=structura(12, 3,A23);
    switch (ur3){
    case 1: {ur4=structura(12,12,A231);goto repit_A23;}
    case 2: {ur4=structura(13,13,A232);goto repit_A23;}
    case 3: {ur4=structura(13,14,A233);goto repit_A23;}
    case 4: {ur4=structura(13,14,A234);goto repit_A23;}
    case 5: {ur4=structura(14,15,A235);goto repit_A23;}
    case 6: {ur4=structura(14,15,A236);goto repit_A23;}
    case 7: {ur4=structura(15,15,A237);goto repit_A23;}
    case 8: {ur4=structura(16,16,A238);goto repit_A23;}
    case 9: {ur4=structura(12,12,A239);goto repit_A23;}
    default:
    }
    goto repit_A2;
}
case 5: {
    repit_A25:

```

```

ur3=structura(15,12,A25);
switch (ur3){
case 1: // как case 3
case 2: // как case 3
case 3: {
    repit_A251:
    ur4=structura(11, 6,A251);
    switch(ur4){
    case 1: {ur5=structura(17,14,A2511);goto repit_A251;}
    case 2: {ur5=structura( 7, 7,A2512);goto repit_A251;}
    case 3: {ur5=structura(11, 7,A2513);goto repit_A251;}
    case 4: {ur5=structura( 7, 7,A2514);goto repit_A251;}
    default:
    }
    goto repit_A25;
    }
default:
}
goto repit_A2;
}
default:
}
goto repit_A;
}
case 3: {
    repit_A3:
    ur2=structura(8,1,A3);
    switch (ur2){
    case 1: {
        repit_A31:
        ur3=structura( 5, 2,A31);
        switch (ur3){
        case 1: {
            repit_A311:
            ur4=structura(18,15,A311);
            switch (ur4){
            case 1: {
                repit_A3111:
                ur5=structura( 7, 6,A3111);
                switch (ur5){

```

Продолжение прил. 2

```

case 1: {ur6=structura( 3, 3,A31111);goto repit_A3111;}
case 2: {
    repit_A31112:
    ur6=structura(12,9,A31112);
    switch(ur6){
    case 1: {ur6=structura( 4, 9,A311121);goto
repit_A31112;}
    case 2: {ur6=structura(11,11,A311122);goto
repit_A31112;}
    default:
    }
    goto repit_A3111;
}
default:
}
goto repit_A311;
}
case 2: {ur5=structura( 7, 5,A3112);goto repit_A311;}
default:
}
goto repit_A31;
}
default:
}
goto repit_A3;
}
case 2: {ur3=structura(19,16,A32);goto repit_A3;}
case 4: {ur3=structura(15,11,A34);goto repit_A3;}
case 5: {ur3=structura(15,12,A35);goto repit_A3;}
case 7: {ur3=structura( 5, 1,A37);goto repit_A3;}
default:
}
goto repit_A;
}
case 4: {
    repit_A4:
    ur2=structura(8,2,A4);
    switch (ur2){
    case 3: {ur3=structura(4,1,A43);goto repit_A4;}
    case 6: {ur3=structura(3,1,A46);goto repit_A4;}

```

```

case 7: {ur3=structura(7,2,A47);goto repit_A4;}
default:
}
goto repit_A;
}
case 5: {
  repit_A5:
  ur2=structura(3,1,A5);
  switch (ur2){
  case 1: {
    repit_A51:
    ur3=structura(7,1,A6);
    switch (ur3){
    case 1:
    case 2:
    case 3: {ur4=structura(5,2,A61);goto repit_A51;}
    default:
    }
    goto repit_A5;
  }
  case 2: {ur3=structura(7,1,A14);goto repit_A5;}
  default:
  }
  goto repit_A;
}
case 6: {
  repit_A6:
  ur2=structura(7,1,A6);
  switch (ur2){
  case 1:
  case 2:
  case 3: {ur3=structura(5,2,A61);goto repit_A6;}
  default:
  }
  goto repit_A;
}
case 7: {
  repit_A7:
  ur2=structura(7,1,A7);
  switch (ur2){
  case 2: {

```

```

    repit_A72:
    ur3=structura(5,1,A72);
    switch (ur3){
    case 4: {ur4=structura(5,1,A724);goto repit_A72;}
    default:
    }
    goto repit_A7;
}
case 4: {ur3=structura(3,1,A74);goto repit_A7;}
case 5: {
    repit_A75:
    ur3=structura(4,1,A75);
    switch (ur3){
    case 1: {ur4=structura(4,1,A751);goto repit_A75;}
    default:
    }
    goto repit_A7;
}
case 6: {
    repit_A76:
    ur3=structura(8,1,A76);
    switch (ur3){
    case 1: {ur4=structura(3,1,A761);goto repit_A76;}
    case 4: {ur4=structura(8,1,A764);goto repit_A76;}
    case 7: {
        repit_A767:
        ur4=structura(4,1,A767);
        switch (ur4){
        case 3: {ur5=structura(4,1,A7673);goto repit_A767;}
        default:
        }
        goto repit_A76;
    }
    default:
    }
    goto repit_A7;
}
default:
}
goto repit_A;
}

```

```

default:
}
}
void MainMenu(void){
LCD_CLS();
stroka=0;
while(keypad()!=BUT_ENTER){
if(keypad()==BUT_DOWN){stroka+=3;LCD_CLS();}
if(keypad()==BUT_UP){stroka-=3;LCD_CLS();}
if(stroka==253){stroka=6;}
if(stroka==9){stroka=0;}
for(i=0;i!=9;i+=3){
if(i==stroka){met=MET_NOT_OR;}else{met=MET_OR;}
LCD_PUTSF(0,i*8,NameMenu[i]);
LCD_PUTSF(0,(i*8)+8,NameMenu[i+1]);
}
if(keypad()==BUT_ESC){return;}
delay_ms(300);
}
met=MET_OR;
if(stroka==0){DiagnXX();} // диагностика на X.X.
if(stroka==3){DiagnH();} // диагностика под нагрузкой
if(stroka==6){PoiskNeispr();} // программа поиска неисправностей
}
void Memory(void){
byte page=0;
NextPage:
LCD_CLS();
LCD_PUTSF(58,0,"График:");
LCD_PUTSF(105,0,NameSave[page]);
DataToGrafik(255,page);
Setka();
delay_ms(900);
while(keypad()!=BUT_ESC){
if(keypad()==BUT_UP){page++;if(page==10){page=9;}goto NextPage;}
if(keypad()==BUT_DOWN){page--;if(page==255){page=0;}goto
NextPage;}
}
}
void Help(void){

```

```

    structura(24,24,Text_help);
}
void init(){
// Timer/Counter 0 initialization
    TCCR0=0x00;
    TCNT0=0x00;
    OCR0=0x00;
// Timer/Counter 1 initialization
    TCCR1A=0x00;
    TCCR1B=0x00;
    TCNT1H=0x00;
    TCNT1L=0x00;
    ICR1H=0x00;
    ICR1L=0x00;
    OCR1AH=0x00;
    OCR1AL=0x00;
    OCR1BH=0x00;
    OCR1BL=0x00;
// Timer/Counter 2 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: 1000,000 kHz
// Mode: Normal top=FFh
// OC2 output: Disconnected
    ASSR=0x00;
    TCCR2=0x02;
    TCNT2=0x00;
    OCR2=0x00;
// ADC initialization
// ADC Clock frequency: 125,000 kHz
// ADC Voltage Reference: Int., cap. on AREF
// Only the 8 most significant bits of
// the AD conversion result are used
    ADMUX=ADC_VREF_TYPE & 0xff;
    ADCSRA=0x86;
// External Interrupt(s) initialization
// INT0: Off
// INT1: Off
// INT2: Off
    MCUCR=0x00;
    MCUCSR=0x00;
    TIMSK=0x00; // Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization

```

```

ACSR=0x80; // Analog Comparator initialization
SFIOA=0x00;
PORTA=0b00000000;
DDRA= 0b00000000;
    // Global enable interrupts
    #asm("sei")
}
void main(void){
    init();
    LCD_INIT();
    LCD_CLS();
    start:
    while(1){
        met=MET_OR; // метод вывода
        LCD_CLS();
        LCD_PUTSF(25,8);
        LCD_PUTSF(31,20);
        LCD_PUTSF(16,32, v1.2");
        while(1){
            if(keypad()==BUT_MENU) {MainMenu();goto start;}
            if(keypad()==BUT_MEMORY){Memory(); goto start;}
            if(keypad()==BUT_INFO) {Help(); goto start;}
        }
    }
}

```

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	4
1.1. Конструктивные особенности и условия формирования характеристик турбокомпрессоров в условиях эксплуатации.....	4
1.2. Анализ причин изменения показателей работоспособности ТКР в эксплуатации	9
1.3. Существующие подходы в оценке технического состояния правильного функционирования ТКР в эксплуатации.....	11
1.3.1. Анализ работоспособности ТКР при наличии в работе двигателя признаков «Низкая мощность двигателя», «Черный дым из выхлопной трубы»	11
1.3.2. Анализ работоспособности ТКР при наличии в работе двигателя признака «Синий дым из выпускной трубы»	12
1.3.3. Анализ работоспособности ТКР при наличии в работе двигателя признака «Повышенный расход масла (без синего дыма)».....	12
1.3.4. Анализ работоспособности ТКР при наличии в работе двигателя признака «Шумная работа турбокомпрессора»	13
1.3.5. Анализ работоспособности ТКР при наличии в работе двигателя признаков повышенной теплонапряженности	14
1.4. Обзор методов и средств диагностирования ТКР при ТО и ремонте мобильной техники.....	18
1.5. Анализ методов поиска неисправностей.....	27
1.6. Классификация контрольно-измерительных приборов.....	32
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТКР В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	40
2.1. Основные понятия и определения, используемые при теоретических исследованиях	40
2.2. Исходные взаимосвязи параметров турбокомпрессора и показателей работы двигателя	41
2.3. Оценка правильности функционирования ТКР по его динамическим характеристикам	45
2.4. Оценка правильности функционирования ТКР по составляющим его КПД	48
2.5. Обоснование границ исправного состояния ТКР.....	51
2.6. Обоснование метода выбора диагностируемых параметров правильного функционирования турбокомпрессора в эксплуатации.....	56
2.7. Развитие методов оценки технического состояния турбокомпрессора по параметрам его функционирования.....	60

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	66
3.1. Экспериментальное оборудование	66
3.2. Методика выбора параметров измерительной системы.....	79
3.3. Оценка погрешностей измерения	83
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТУРБОКОМПРЕССОРА В ЭКСПЛУАТАЦИИ	86
4.1. Анализ показателей функционирования ТКР в условиях регуляторной характеристики двигателя	86
4.2. Результаты проверки адекватности математической модели	89
4.3. Изменения показателей правильного функционирования ТКР при имитации неисправностей в системе наддува.....	90
5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ	97
5.1. Технология диагностирования технического состояния правильного функционирования турбокомпрессора	97
5.2. Технология встроенной системы диагностирования технического состояния турбокомпрессора.....	104
5.3. Расчет экономической эффективности метода диагностирования .	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	146
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	148
Приложение 1	164
Приложение 2	167

Научное издание

Лянденбургский Владимир Владимирович
Иншаков Александр Павлович
Курбаков Иван Иванович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ТУРБОКОМПРЕССОРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ МОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Монография

В авторской редакции
Верстка Н.А. Сазонова

Подписано в печать 15.06.15. Формат 60x84/16.
Бумага офсетная. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 11,39. Уч.-изд. л. 12,25. Тираж 500 экз. 1-й завод 100 экз.
Заказ № 234.

Издательство ПГУАС.
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.