

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Волгодонский инженерно-технический институт -  
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
(ВИТИ НИЯУ МИФИ)

На правах рукописи



**Дембицкий Артем Евгеньевич**

**МНОГОКАНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ  
ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО  
СОСТОЯНИЯ УСТАНОВОК АВАРИЙНОГО ПИТАНИЯ АЭС**

2.2.11 – Информационно-измерительные  
и управляющие системы (технические науки)

**Диссертация**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
профессор Чернов А.В.

Волгодонск 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ АВАРИЙНОГО ПИТАНИЯ АЭС .....	13
1.1 Системы обеспечения безопасности эксплуатации АЭС .....	13
1.2 Методы и средства оценки работоспособности установок аварийного питания АЭС.....	21
1.2.1 Анализ штатных систем диагностирования.....	21
1.2.2 Методы контроля параметров технического состояния оборудования.....	26
1.2.3 Показатели эффективности современных систем диагностики дизель-генераторного оборудования .....	32
1.3 Цель и задачи исследования .....	34
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....	37
2.1 Принципы построения информационно-измерительных диагностических систем сложных технических объектов .....	37
2.1.1 Критерии эффективности ИИДС .....	37
2.1.2 Исследование возможности использования принципа многоканальности в диагностических системах .....	41
2.1.3 Методика построения многоканальной ИИДС .....	45
2.2 Совершенствование методики обработки диагностической информации многоканальных информационно-измерительных систем.....	50

2.2.1 Методика преобразования диагностических сигналов в многомерном измерительном пространстве главных компонент .....	50
2.2.2 Кластеризация данных в диагностических процедурах .....	57
Выводы по главе 2 .....	66
3 СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ИИДС.....	68
3.1 Обоснование требований к техническим характеристикам измерительных средств .....	68
3.2 Анализ результатов экспериментальных исследований диагностических сигналов .....	74
Выводы по главе 3 .....	85
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ИИДС ДИАГНОСТИКИ ДГУ РЕЗЕРВНОГО ПИТАНИЯ В ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ.....	86
4.1 Программно-техническая реализация диагностического комплекса. ER-модель базы данных ИИДС .....	86
4.2 Опытные-промышленные испытания ИИДС .....	93
4.2.1 Результаты испытаний ИИДС в штатном режиме диагностирования .....	93
4.2.2 Комплексная оценка состояния ДГУ с использованием многомерного измерительного пространства .....	110
Выводы по главе 4 .....	115
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ.....	117
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	133

ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....	146

## СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АЭС	-	атомная электрическая станция
АСУ ТП	-	автоматизированная система управления технологическими процессами
БЩУ	-	блочный щит управления
БД	-	база данных
ВВЭР	-	водо-водяной энергетический реактор
ВК	-	вибрационный контроль
ВКВ	-	верхний коленчатый вал
ГТН	-	главный топливный насос
ГК	-	главные компоненты
ДГУ	-	дизель-генераторная установка
ДД	-	дизельный двигатель
ДВС	-	двигатель внутреннего сгорания
ЖК	-	жидкокристаллический
ИД	-	контроль индикаторных диаграмм
ИИС	-	информационные измерительные системы
ИФ	-	информационная функция
КИП	-	системы контроля и измерений реактора
МЗ	-	машинный зал
МГК	-	метод главных компонент
НКВ	-	- нижний коленчатый вал
НВОАЭС	-	Нововоронежская АЭС
ПДГУ	-	передвижная дизель-генераторная установка
ПНС	-	передвижная насосная станция
ПК	-	персональный компьютер
ПО	-	программное обеспечение
ППР	-	планово-предупредительный ремонт
РДЭС	-	резервная дизельная электростанция
СБ	-	системы безопасности
СН	-	собственные нужды
СУЗ	-	системы управления и защит реактора
САОР	-	система аварийного останова реактора
СКЗ	-	среднеквадратичные значения
ТВЭЛ	-	тепловыделяющий элемент

ТНВД	- топливный насос высокого давления
ТВК	- тепловизионный контроль
ТИК	- тепловизионный измерительный канал
УЗП	- контроль ультразвуковых параметров
ФУОВТ	- фактический угол отклонения впрыска топлива
ФПРВ	- функция плотности распределения вероятности
ЦПГ	- цилиндропоршневая группа
ЭВМ	- электронно-вычислительная машина
MSIV	- главный клапан отсечения пара

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования.** Безопасность является наивысшим приоритетом при эксплуатации атомных станций. Она во многом определяется эффективностью организации непрерывного мониторинга работоспособности оборудования [1]. Особое внимание уделяется работоспособности систем, предназначенных для вывода атомной электростанции из аварийного состояния.

В атомной энергетической отрасли накоплен значительный опыт диагностического сопровождения энергетического оборудования. Однако результаты анализа инцидентов на различных АЭС, а также события, произошедшие на энергоблоках «Фукусима-1» при отсутствии резервного питания, выделяют задачи мониторинга состояния оборудования аварийного электроснабжения в отдельную организационно-техническую проблему, требующую использования более эффективных методов диагностики.

Традиционные методы диагностирования дизель-генераторного оборудования в основном направлены на выявление дефектов, возникающих в результате износа при длительной эксплуатации. Характер требований к системам резервного питания на АЭС сконцентрирован на обеспечении безусловной гарантированной готовности к включению в момент обесточивания систем безопасности [2]. Используемые в настоящее время локальные диагностические комплексы, осуществляющие нормативный вибрационный, ультразвуковой и тепловизионный контроль, не гарантируют достаточно высокую надежность и точность диагностических заключений. Проходящий в настоящее время переход АЭС с 12-месячного на 18-месячный топливный цикл приводит к дополнительным требованиям по обеспечению качества диагностического сопровождения. Помимо этого, внедрение автоматизированных информационно-измерительных систем диагностики способствует сокращению времени проведения планово-предупредительного ремонта, что также является важным показателем [3].

В ходе анализа результатов исследований, полученных Павелко В.И., Никифоровым В.Н., Адаменковым А.К., Черновым А.В., Абидовой Е.А., Thomas J., Wang Y., установлена перспективность разработок, направленных на повышение эффективности информационно-измерительных диагностических систем, формирующих комплексную оценку состояния оборудования [4-11,45,58,67].

**Научная новизна диссертационной работы:**

1 Научно обосновано введение дополнительных критериев изолируемости и идентифицируемости, при разработке структуры многоканальных диагностических систем, что наряду с известными критериями оценки полноты поиска и ошибок обнаружения, обеспечивает повышение эффективности использования информационно-измерительных диагностических систем (п.1 паспорта специальности).

2 Разработана методика преобразования диагностических сигналов, представленных временными рядами, в соответствующие кластеры многомерного измерительного пространства, существенно расширяющая функциональные возможности информационно-диагностических систем за счет повышения чувствительности диагностических процедур (п.4 паспорта специальности).

3 Анализ параметров диагностических сигналов в многомерном пространстве главных компонент обеспечивает экспериментально подтвержденное повышение чувствительности диагностических процедур при выявлении дефектов энергетического оборудования (п.6 паспорта специальности).

4 Программное обеспечение, разработанное на основе предложенной ER-модели отличающееся от существующего возможностью визуализации комплексной диагностической информации за счет сокращения размерности измерительного пространства методом главных компонент (п.7 паспорта специальности).



**Соответствие паспорту специальности.** Полученные результаты соответствуют специальности 2.2.11 Информационно-измерительные и управляющие системы по пунктам:

П.1 Научное обоснование перспективных информационно-измерительных и управляющих систем, систем их контроля, испытаний и метрологического обеспечения, повышение эффективности существующих систем.

П.4 Расширение функциональных возможностей информационно-измерительных и управляющих систем на основе применения методов измерений контролируемых параметров объектов для различных предметных областей исследования.

П.6 Методы анализа, диагностики, идентификации и управления техническим состоянием информационно-измерительных и управляющих систем, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта.

П.7 Методы и системы программного и информационного обеспечения процессов исследования и испытаний образцов информационно-измерительных и управляющих систем, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта.

**Обоснованность и достоверность** научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечиваются:

- подтверждением теоретических результатов, полученных автором, с результатами экспериментальных исследований;
  - использованием метрологически аттестованного измерительного оборудования;
  - использованием современных программных средств;
  - отзывами ведущих специалистов по диагностике оборудования АЭС;
- результатами опытно-промышленных испытаний.

**Практическая значимость диссертационной работы** состоит в возможности использования полученных теоретических результатов в качестве основы для разработки информационно-измерительных диагностических систем

мониторинга технического состояния оборудования резервного питания АЭС, обеспечивающих выявление дефектов на более ранних стадиях развития.

**На защиту выносятся следующие положения:**

- структура многоканальной информационно-диагностической системы мониторинга состояния оборудования резервного питания АЭС, созданная с использованием дополнительных критериев;
- разработанная методика обработки диагностической информации обеспечивающий выявление дефектов на более ранних стадиях развития;
- программное обеспечение информационно-измерительной диагностической системы, реализующее алгоритмы как штатных диагностических процедур, так и комплексного многомерного анализа с возможностью визуализации диагностической информации;
- результаты анализа параметров диагностических сигналов в многомерном пространстве главных компонент, подтверждающие повышение чувствительности диагностических процедур.

**Апробация диссертационной работы**

Результаты исследований, проведенных как в лабораторных, так и в производственных условиях, позволяют рекомендовать использование данной ИИДС при диагностике дизель-генераторных установок (ДГУ).

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- XII-XV Международные научно-практические конференции «Безопасность ядерной энергетики», 2016-2019 гг., г. Волгодонск;
- XLI Международная научно-техническая конференция «Кибернетика энергетических систем», 2019 г., г. Новочеркасск;
- V, VI Всероссийские научные конференции «Системы обеспечения техносферной безопасности», 2018, 2019 гг., г. Таганрог;
- Международная научно-техническая конференция «55 лет безопасной эксплуатации АЭС с ВВЭР в России и за рубежом», 2019 г., г. Нововоронеж;

- XIII Международная научно-практическая конференция «Динамика технических систем», 2019 г., г. Ростов-на-Дону;
- Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2020» (ICMTMTE 2020), 7-11 сентября 2020 г. Севастополь, Россия.
- XVI Международная научная конференция «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах (МАБР – 2020)» 2020 г., г. Санкт-Петербург;
- II Международная конференция «Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг» (APITECH-II – 2020). 2020 г., г. Красноярск;
- XVI Международная конференция по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения», 2021 г., г. Санкт-Петербург.

**Личный вклад автора.** Автором реализована задача системной организации информационного пространства, проведение системного синтеза информационных потоков и метрологического анализа информационно-измерительной системы, сформулированных научным руководителем, осуществление практической реализации путем разработки и внедрения ИИДС мониторинга технического состояния оборудования резервного питания АЭС.

**Публикации.** Результаты исследований опубликованы в 14 работах, из них 6 - в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 2 - в журналах, входящих в перечень Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 72 наименований. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка.

**Результаты работы были использованы и внедрены:**

- 1) на ООО "Волгодонская тепловая генерация" при диагностике дизель-генераторного оборудования;

2) на Нововоронежской АЭС при диагностике дизель-генераторного оборудования;

3) в учебном процессе в Волгодонском инженерно-техническом институте – филиале Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ВИТИ НИЯУ МИФИ) г. Волгодонск Ростовской области.

# 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ АВАРИЙНОГО ПИТАНИЯ АЭС

## 1.1 Системы обеспечения безопасности эксплуатации АЭС

Системы безопасности АЭС обеспечивают надежную, безопасную эксплуатацию оборудования в целом. В зависимости от выполняемых функций, системы безопасности (СБ) АЭС разделяются на: защитные, локализирующие, управляющие и обеспечивающие [3].

Защитные СБ предотвращают или ограничивают повреждение ядерного топлива, оболочек ТВЭЛов, оборудования и трубопроводов, содержащих радиоактивные вещества.

Локализирующие СБ предотвращают или ограничивают распространение выделившихся при инцидентах и авариях (если они все же произошли) радиоактивных веществ и материалов.

Управляющие СБ приводят в действие все отвечающие обстановке системы и средства и обеспечивают контроль и управление ими в процессе выполнения заданных функций.

Обеспечивающие СБ снабжают защитные, локализирующие и управляющие системы безопасности энергией, рабочей средой и создают условия их безотказного функционирования.

Резервная дизельная электростанция (РДЭС) является одной из обеспечивающих систем безопасности АЭС и должна постоянно находиться в работоспособном состоянии. РДЭС предназначены для аварийного электроснабжения потребителей систем безопасности в следствии выхода из строя или отключения внешних систем электропитания. Обеспечение бесперебойной работы дизель-генераторного оборудования является одним из основных требований при эксплуатации АЭС, реализуемых средствами своевременной и качественной диагностики [5-10].

К дизельным двигателям, находящимся в составе ДГУ для аварийного энергоснабжения систем безопасности АЭС, предъявляются особые требования по их надежности, которые постоянно ужесточаются [61].

Данный факт показывает важность работоспособности РДЭС, что в свою очередь должно обеспечиваться своевременной и качественной диагностикой дизельного оборудования АЭС. В таблице 1.1 приведен анализ инцидентов с ДГУ АЭС за последние тридцать лет, а также отмечены их причины и последствия.

Таблица 1.1 - Анализ инцидентов с ДГУ АЭС за последние тридцать лет

Год	Место события	Характер инцидента	Причина	Последствия
1	2	3	4	5
1989	АЭС "Калверт Клифс", США	Не сработали два дизель-генератора	Отсутствие автоматического включения	Остановка блоков
1990	АЭС "Вогтль", США	Аварийный дизель-генератор отключился на 70-й секунде автоматического пуска	Дефект датчика (про дефект было известно в течение пяти лет)	Вода в контуре охлаждения реактора нагрелась с 32 до 58 Цельсия
2006	АЭС "Форсмарк", Швеция	Отказ двух из четырех аварийных дизель-генераторов	Отказ выпрямителей, вызванный переходным процессом в энергосети	Инициализация двух заглушенных реакторов
2011	АЭС "Трикастин-3", Франция	Отказ резервного дизель-генератора	Преждевременная деградация подшипников	В случае отказа внешней электросети и резервной сети (аварийное электроснабжение) источник питания Tricastin 3/4 для отвода остаточного тепла в активной зоне реактора не был бы защищен; в худшем случае это могло привести к расплавлению активной зоны обоих блоков. INES 2

1	2	3	4	5
2012	АЭС "Козлодуй", Болгария	Выведен из режима готовности дизель-генератор III системы безопасности	Пропуск воды к одному из цилиндров дизель-генератора	-
2012	АЭС "Кори", Южная Корея	Сразу три дизель-генератора не были готовы к работе. Руководство пыталось скрыть инцидент	Ремонтник, занимался профилактикой дизель-генераторной станции в нарушение предписания инструкций и своего бригадира	Неконтролируемое повышение температуры в активной зоне и бассейне выдержки ОЯТ
2013	АЭС "Козлодуй", Болгария	Неготовность дизель-генератора третьего канала системы безопасности	Дефект датчика давления воздуха в системе защиты топливной системы дизель-генератора	-
2014	АЭС Энрико Ферми, США	Возгорание дизель-генератора при пуске	Возгорание изоляции	-
2017	Ростовская АЭС	Разрушение подшипников	Электрохимическая коррозия	Простой энергоблока

Очевидно, что выход из строя дизельных двигателей и, соответственно, дизель-генераторных установок может привести к последствиям, аналогичным, например, тем, которые произошли в 2011 г. на японской АЭС «Фукусима-1», где из-за выхода из строя дизелей ДГУ, питавших систему охлаждения реактора, эта система перешла на питание от аварийных аккумуляторов, емкости которых были недостаточны, чтобы обеспечить интенсивное охлаждение реактора. Реактор стал перегреваться, что привело к повреждению тепловыделяющих элементов, частичному расплавлению уранового топлива и последующему тепловому взрыву [12].

Для обеспечения требуемой надежности дизельных двигателей в составе ДГУ необходимы высокие ресурс и надежность их механизмов, узлов и деталей. С учетом того, что ресурс и надёжность двигателей внутреннего сгорания определяются прежде всего работоспособностью подшипников скольжения верхней головки шатуна и коленчатого вала и деталей цилиндропоршневой

группы, вопрос о повышении работоспособности и ресурса подшипников дизельных двигателей ДГУ имеет особо важное значение.

Основными элементами дизеля, определяющими его техническое состояние, являются: остов (блок) дизеля, коленчатый вал, коренные и шатунные подшипники, шатун, поршень рабочего цилиндра, втулка рабочего цилиндра, зубчатые передачи (шестерни), а также навесное оборудование (насосы, турбокомпрессоры).

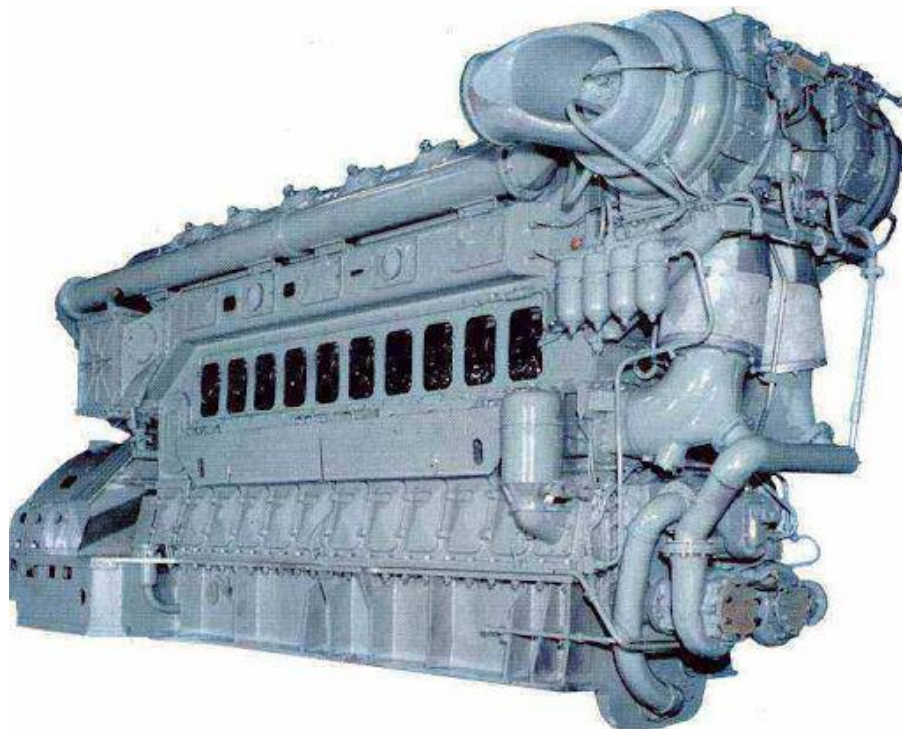


Рисунок 1.1 – Общий вид дизеля Д-100

Указанные ответственные элементы дизеля во время запуска и работы на мощности подвергаются воздействию значительных знакопеременных нагрузок, ударным и термическим воздействиям, а цилиндровые втулки рабочих цилиндров коррозионно-эрозионному износу, в том числе и в режиме «Ожидания». Быстрый набор нагрузки, при работе по «программе ступенчатого пуска», также оказывает неблагоприятное воздействие на детали цилиндропоршневой группы, подшипники коленчатого вала [9-11].

ДГУ АЭС (РДЭС) при нормальной эксплуатации находится в режиме «Ожидания». Диагностические исследования ДГУ выполняются во время периодических испытаний, в соответствии с графиком опробований систем



безопасности (ДГУ), при работе блока на мощности, или при специальных испытаниях ДГУ после планово-предупредительного ремонта блока [60,64]. Регистрация диагностической информации должна производиться в период функционирования ДГУ после стабилизации ее температурных параметров [8-10].

Для регистрации достоверной и объективной диагностической информации узлы и системы ДГУ должны принять рабочую температуру под действием эксплуатационных нагрузок [11,65].

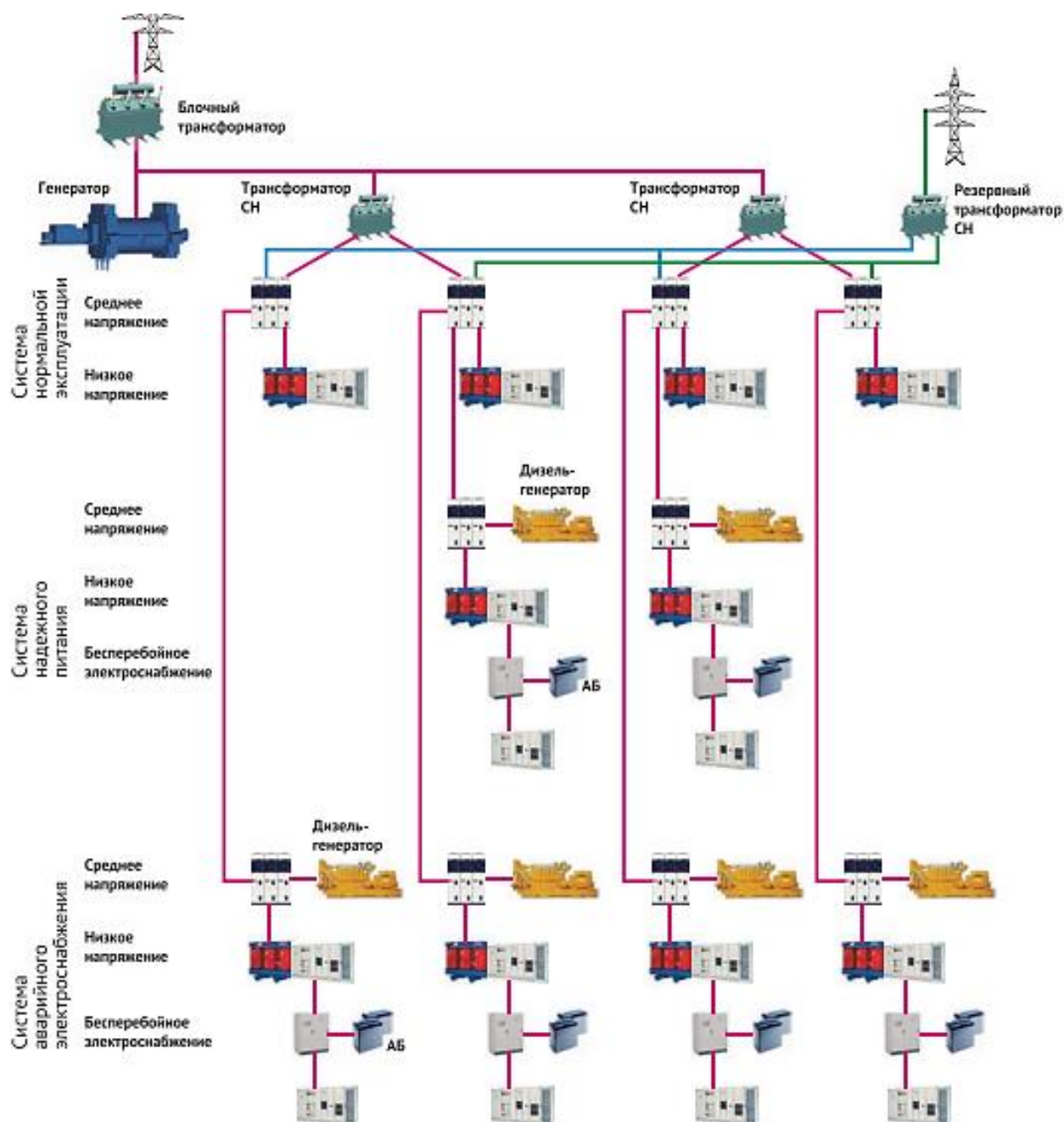


Рисунок 1.2 – Схема системы резервного питания оборудования АЭС

В соответствии с предъявляемыми требованиями в отношении надежности электроснабжения потребители СН АЭС разделяются на три группы: I — особо ответственные потребители, не допускающие перерывов питания и требующие обязательного питания после срабатывания аварийной защиты; II — особо ответственные потребители, допускающие перерыв питания на время 1—3 мин, что позволяет осуществить автоматический ввод резервного питания от автономного источника; они также требуют питания после срабатывания аварийной защиты; III — потребители, не предъявляющие повышенных требований к надежности электроснабжения [3].

В состав потребителей группы I входят электроприемники системы управления и защиты реактора (СУЗ), системы контроля и измерений реактора, системы дозиметрического контроля за содержанием радиоактивных излучений, системы памяти и логики информационно-вычислительной части АСУ ТП, аппаратура управления и автоматики, система аварийного останова реактора (САОР), двигатели аварийных масляных насосов системы регулирования и смазки турбины и т. п. Перечисленные электроприемники имеют небольшие единичные мощности и нуждаются в источниках энергии трехфазного переменного тока с напряжением 380 — 660 В и постоянного тока с напряжением 220 В.

К группе II потребителей относятся электродвигатели насосов, обслуживающих первый радиоактивный контур и его вспомогательные устройства; электродвигатели САОР; электроприемники ответственных вспомогательных систем, участвующих в обеспечении безопасности АЭС, — спецвентиляции, аварийного освещения, противопожарной защиты; электродвигатели аварийных питательных насосов и технической воды; электроприводы быстродействующих клапанов и арматуры САОР и т. д. Поскольку диапазон единичных мощностей указанных электроприемников довольно широк, для их электроснабжения необходимо предусмотреть два уровня напряжения трехфазного переменного тока: 6 — 10 кВ для питания

мощных двигателей и 380 — 660 В для двигателей малой мощности и прочих электроприемников этой группы.

Потребители группы III аналогичны электроприемникам СН ТЭС. Их электроснабжение осуществляют на двух ступенях напряжения трехфазного переменного тока: 6-10 кВ и 380-660 В

Дизель-генераторные установки (ДГУ) номинальной мощностью 500 кВт и выше входят в состав резервных дизельных электростанций (РДЭС) систем безопасности АЭС и предназначены для эксплуатации в режимах ожидания, автономной продолжительной работы для питания электрической энергией переменного тока частотой 50 Гц, номинальным напряжением 400 В, 6300 В, 10500 В в случае обесточивания потребителей электроэнергии 1-й и 2-й группы надежности.

Анализ аварии, возникшей на АЭС «Фукусима – 1» в Японии в марте 2011 года показал уязвимость конструкции РДЭС. После землетрясения магнитудой 9.0 баллов возникло цунами, гигантская волна высотой 15 метров затопила энергоблоки станции, вызвала отключение их энергоснабжения, что привело к остановке системы охлаждения нескольких реакторов. В реакторах первого, второго и третьего блоков ядерное топливо расплавилось, скопилось на дне защитной оболочки реакторов, прожгло ее и вытекло в подреакторное пространство [12].

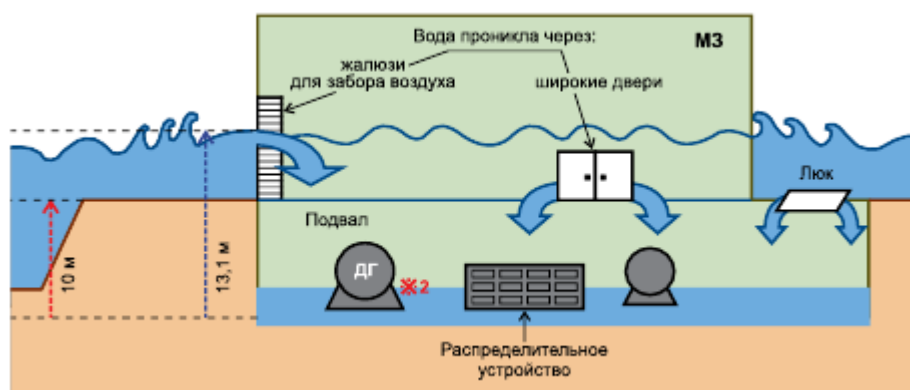


Рисунок 1.3 – Схема проникновения воды в подвал машинного зала и залива дизель-генераторов АЭС «Фукусима-1»

В результате землетрясения на реакторе первого блока F-1 сработала аварийная защита, и все стержни СУЗ были введены в активную зону. Реактор был заглушен. Одновременно из-за разрушений, вызванных землетрясением, прекратилось внешнее электроснабжение станции.

Через 6 с подключились резервные дизель-генераторы 1А и 1В, находившиеся в цокольном этаже МЗ. Система безопасности перекрыла MSIV — главный клапан отсечения пара. Пар из реактора перестал поступать в турбину. Закрытие клапана привело к подъему давления в корпусе реактора. В то же время уровень охлаждающей воды оставался в допустимых пределах, и необходимости подключения системы HPCI не возникло [12].

После удара второй волны цунами аварийные дизель-генераторы были затоплены и отключились. Насосы, подающие морскую воду для охлаждения силовых механизмов, также оказались под водой.

Распределительные щиты системы аварийного энергоснабжения были выведены из строя — произошли многочисленные короткие замыкания. То же случилось и на первом блоке, перенаправить электроэнергию на первый блок стало невозможно. Батареи аккумуляторов постепенно выходили из строя.

Позднее произошел отказ всех функций охлаждения реактора. Несмотря на героические усилия персонала и попытки наладить электроснабжение блоков путем подключения присланных передвижных дизель-генераторных электростанций произошли взрывы и пожары на всех четырех блоках АЭС «Фукусима-1» [12].

По результатам расследования событий на АЭС «Фукусима-1» Концерн «Росэнергоатом» принял решение приобрести на все АЭС РФ дополнительные дизель-генераторы большой мощности — двухмегаваттные. Также были приобретены автономные насосы (мотопомпы) и дизель-генераторы меньшей мощности для решения конкретных задач.

Анализ инцидентов, связанных с выходом из строя ДГУ АЭС подтверждает важность диагностирования и своевременного выявления дефектов данного оборудования. Частота инцидентов подтверждает, что

штатных методов диагностики недостаточно. Необходимо внедрения новых комплексных информационно-измерительных систем диагностики, которые способны выявлять дефекты на ранних стадиях развития и тем-самым способствовать увеличению надежности исследуемого оборудования.

## 1.2 Методы и средства оценки работоспособности установок аварийного питания АЭС

### 1.2.1 Анализ штатных систем диагностирования

Основными задачами диагностирования ДГУ АЭС, являются [13]:

- оценка технического состояния цилиндропоршневой группы (ЦПГ);
- оценка технического состояния топливной аппаратуры;
- оценка технического состояния подшипников коленчатых валов;
- оценка технического состояния навесного оборудования;
- выявление механических дефектов генератора, в первую очередь подшипников;
- выявление электрических дефектов генератора;
- определение температурных параметров работы дизеля и сопоставление их с паспортными данными;
- расчет эффективности организации теплового процесса, экономических и экологических показателей дизеля.

Дизельные двигатели – разновидность поршневых двигателей внутреннего сгорания, отличающиеся тем, что воспламенение в цилиндрах происходит за счет сжатия топливовоздушной смеси. При расширении продуктов горения в цилиндре перемещается поршень и связанный с ним шатун вращает коленвал [18].

В основе работы дизелей может лежать четырехтактный либо двухтактный цикл. В первом случае два оборота коленчатого вала осуществляются за счет следующих событий: 1) впуск воздуха в цилиндр через впускной клапан при перемещении поршня вниз; 2) сжатие воздуха при перемещении поршня вверх и подача топлива от ТНВД через форсунки; 3) воспламенение и ход поршня вниз

за счет расширения воспламенившейся смеси; 4) выпуск отработавших газов из цилиндра через открытый выпускной клапан при перемещении поршня вверх [18].

Если дизель двухтактный, для совершения одного оборота коленчатого вала должны реализоваться следующие действия: 1) удаление за счет открытия выпускных окон (в стенке цилиндра) продуктов горения и почти одновременно впуск воздуха в цилиндр через впускные окна при перемещении поршня вверх, впрыск топлива; 2) воспламенение и ход поршня вниз за счет расширения воспламенившейся смеси [18].

Очевидно, работа дизелей обеспечивается правильным функционированием топливной аппаратуры, – ТНВД и форсунок, - и исправностью цилиндропоршневой группы. Неправильная настройка, например, кулачков ТНВД или износ резиновых колец, уплотняющих впускные окна, приводит к неравномерности вращения коленчатого вала и, как следствие, ухудшению качества вырабатываемой электроэнергии, повышенному расходу топлива, преждевременному износу [18].

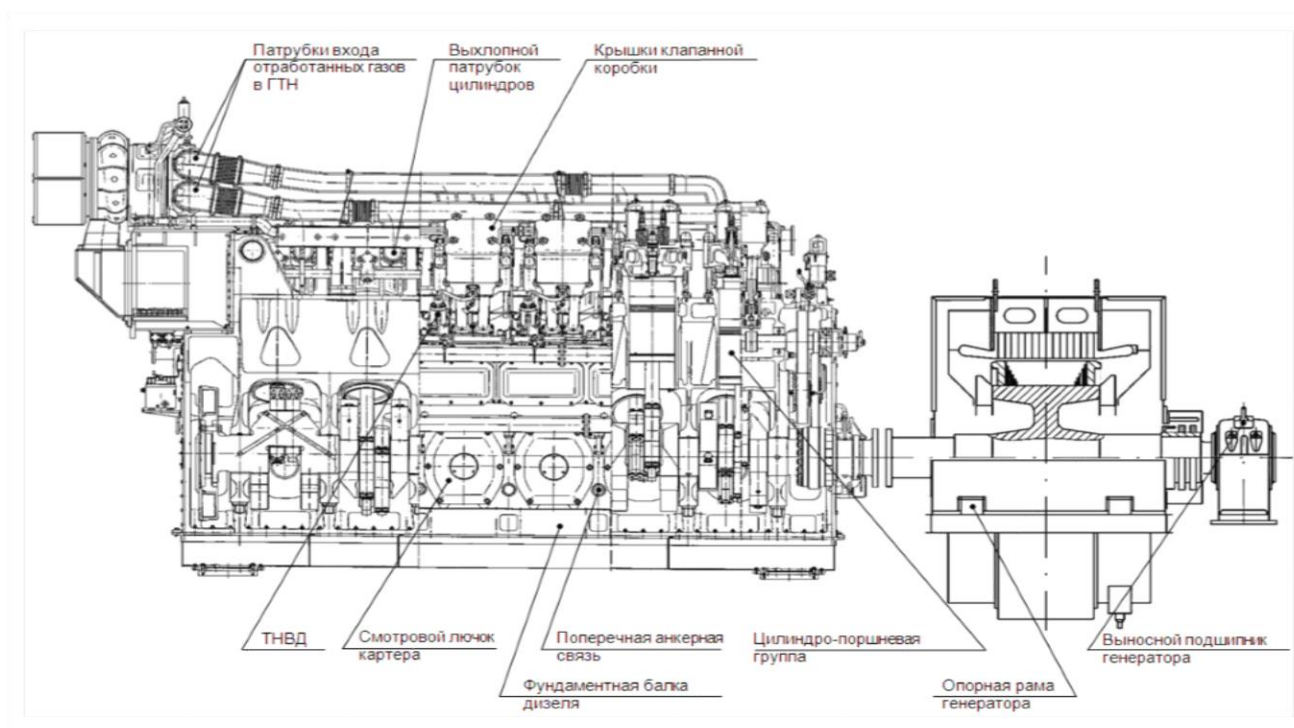


Рисунок 1.4 – Выбор контролируемых элементов конструкции ДГУ

Работа дизелей также невозможна без подачи воздуха в цилиндры, которая осуществляется газотурбонагнетателем. Перемещение частей дизеля друг относительно друга затруднительно без смазки, которая подается масляным насосом. Защита дизеля от перегрева осуществляется за счет циркуляции жидкости в системе охлаждения, которую обеспечивает водяной насос или два водяных насоса, если охлаждение двухконтурное (16V400G63, 20V400G23). Уязвимой деталью ГТН, насосов воды и масла являются подшипники. Поломки подшипников, в которых вращается коленвал, приводят к выходу дизелей из строя.

Таким образом, при диагностировании любого дизеля контролю (при условии доступности) должны подвергаться следующие элементы конструкции: ТНВД, форсунки, цилиндры, подшипники коленчатого вала, подшипники ГТН, насосов воды и масла [19].

Важной для диагностирования особенностью является расположение цилиндров друг относительно друга.

При V-образном исполнении поршни двигаются под углом друг к другу, вращая один коленчатый вал при этом клапанами открытия и закрытия каждого из рядов цилиндров управляют распределительные валы. Контроль подшипников коленчатого вала можно проводить с одной стороны, что удобно сделать через выступающие над корпусом анкерные связи, скрепляющие подшипниковый вкладыш. Подшипники распредвала по левому и правому борту возможно контролировать только на корпусе (остове). Конструкция V-образных дизелей допускает контроль ТНВД и цилиндров, расположенных по левому и правому борту через смотровые окна. Форсунки же для контроля неразрушающими методами недоступны [19].

Генераторы представляют собой синхронные машины, состоящие из неподвижного статора и вращающегося в подшипниках ротора. Как во всех синхронных машинах, ротор представляет собой электромагнит, питающийся постоянным током через щеточно-коллекторный аппарат [20].

Основные элементы ДГУ и штатные методы диагностирования представлены в таблицах 1.2 и 1.3.

Таблица 1.2 – Объекты контроля ДГУ

№	Объект контроля	Вид	Основная цель контроля
Дизель			
1	Форсунки 1-20	УЗП	Оценка технического состояния форсунок
		ТВК	Определение равномерности работы форсунок
2	ТНВД 1-10	УЗП	Оценка технического состояния ТНВД
3	Выхлопные патрубки цилиндров	ТВК	Контроль температуры выхлопных газов
4	Цилиндры 1-10	УЗП, ИД	Определение технического состояния ЦПГ
5	ВКВ и НКВ	ВК, УЗП	Оценка исправности подшипников валов
		ТВК	Выявления мест повышенного механического сопротивления
Навесное оборудование			
6	Масляный насос	ВК, УЗП ТВК	Оценка исправности подшипников масляного насоса
			Температура корпуса масляного насоса
7	Водяной насос охлаждения дизеля	ТВК	Температура корпуса насоса
8	Вод. насос охлажд. наддув. воздуха	ТВК	Температура корпуса насоса
9	Турбокомпрессоры	ВК, УЗП, ТВК	Оценка исправности подшипников турбокомпрессора
			Контроль температуры выхлопных газов
Генератор			
10	Подшипник генератора	ВК, УЗП, ТВК	Оценка исправности подшипника генератора
11	Корпус генератора	ВК, УЗП, ТВК	Выявление механических и электрических дефектов генератора
			Выявление электрических дефектов
12	Щеточный механизм	ТВК	Выявление дефектов щеточного механизма

Исправность электрической машины определяется в первую очередь состоянием обмоток статора и подшипников. При эксплуатации синхронных машин зачастую возникают сложности с щеточно-коллекторным питанием ротора, которое необходимо контролировать. Электрические параметры



генератора в свою очередь контролируются штатными средствами в полном объеме.

Таблица 1.3 - Штатные методы диагностирования ДГУ

Метод диагностирования	Решаемые задачи
Измерение давления в цилиндрах на протяжении рабочего цикла	Определение отклонения ФУОВТ Определение степени неравномерности вращения коленвала Определение зазоров в сочленении поршня (косвенно)
Химический анализ сажи (на предмет наличия продуктов неполного сгорания)	Определение отклонения ФУОВТ (косвенно) Определение износа уплотнительных колец поршневых цилиндров (косвенно)
Спектральный анализ отработанного масла (на предмет обнаружения следов разрушения)	Выявление дефектов отдельных узлов и деталей
Вибродиагностика	Выявление грубых эксплуатационных дефектов Определение отклонения ФУОВТ Определение степени неравномерности вращения коленвала Определение износа уплотнительных колец поршневых цилиндров Определение зазоров в сочленении поршень-цилиндр Выявление дефектов отдельных узлов и деталей Выявление дефектов на ранних стадиях развития Определение тенденции состояния Прогнозирование состояния
Контроль ультразвуковых параметров	Оценка технического состояния форсунок Оценка технического состояния ЦНВД Оценка исправности подшипников
Тепловизионный контроль	Выявление отклонений температурных показателей отдельных узлов и деталей Оценка качества организации теплового процесса

Чтобы повысить точность получаемых результатов нужно использовать комплексный анализ оборудования, так как оборудование достаточно сложное и регистрируемые параметры разные по физическому смыслу. Тем не менее, эти параметры связаны между собой [17,29].

### 1.2.2 Методы контроля параметров технического состояния оборудования

Состояние оборудования резервного питания систем АЭС характеризуется множеством различных параметров, которые зависят от исправности отдельных элементов и правильной настройки установки [40,41,42]. Чтобы качественно и максимально подробно провести диагностику оборудования необходимо использовать комплексный подход. Нужно выбрать минимальное и достаточное количество методов диагностики, которыми можно получить данные характеризующие состояние оборудования.

Исходя из проведенного анализа методов диагностирования можно сделать вывод, что для комплексной оценки состояния дизель-генераторной установки может быть достаточно использования основных методов диагностики – это вибродиагностика, контроль ультразвуковых параметров, проведение тепловизионного контроля и проведения контроля давления в цилиндрах.

#### Обоснование выбора вибрационного контроля

Необходимо обеспечить обобщенную проверку механизма дизеля и генератора с точки зрения возможности их эксплуатации. Вибрационный контроль уровня вибрации в точках на корпусе дизеля и генератора, установленных по ГОСТ 31349-2007, с последующим сравнением параметров вибрации с их нормативными значениями, определенными для машин данной конструкции позволяет сделать вывод о возможности дальнейшей эксплуатации ДГУ [70]. Сравнение текущих данных ВК с результатами заводских испытаний позволяет установить тенденцию технического состояния.

#### Обоснование выбора тепловизионного контроля

Проведение тепловизионного контроля дизеля позволяет вовремя выявить дефекты элементов топливной аппаратуры (ТНВД, форсунки), которые не обеспечивают необходимый рабочий процесс дизеля, что дает возможность оперативно восстановить необходимые мощностные, экономические и экологические характеристики дизеля [47]. Кроме того, оперативный контроль элементов топливной аппаратуры позволяет оценить качество ремонта и, в

случае необходимости, принять соответствующие меры для улучшения технического состояния дизеля. Контроль температуры выпускных патрубков цилиндров, температуры рабочих сред, максимальное давление сгорания в каждом цилиндре характеризуют равномерность работы цилиндров и эффективность работы дизеля в целом. Контроль температурного состояния остова дизеля и его основных агрегатов позволяет выявить места с резко выраженным изменением температурного поля, что очевидно является следствием повышенного сопротивления (трения) в сопрягаемых узлах.

#### Обоснование контроля ультразвуковыми преобразователями

Для углубленного анализа работы ДГУ необходим контроль отдельных деталей и узлов, наиболее важных с точки зрения контроля ресурса оборудования, обеспечения экономичности работы ДГУ. Объектами контроля должны являться ЦПГ и топливная аппаратура, подшипники коленвалов, подшипники распределительных валов, подшипники генератора, навесное оборудование. Исходя из опыта диагностирования ДГУ типа 15Д-100, 12ZV40/48+S2445-12, и ДГУ АСД-5600, ультразвуковой сигнал, измеренный на данном оборудовании, чувствителен к соударениям, изменению давления, крутильным колебаниям, связанным с циклической работой механизма. Контроль УЗП необходим для выявления неисправностей, снижающих ресурс работы ДГУ: неравномерности работы цилиндров, отклонение фактического угла впрыска топлива, неплотное прилегание уплотнительных колец, зазоры в сочленении.

#### Обоснование контроля давления сжатия

При испытаниях ДГУ 12ZV40/48+S2445-12 предусматривается контроль максимального давления сгорания в цилиндрах. Отличие максимального давления сгорания в отдельных цилиндрах указывает на некоторые неисправности двигателя, связанные с нарушениями рабочих процессов.

На АЭС РФ для диагностирования технического состояния ДГУ и ДВС используются тепловизоры, различные системы вибродиагностики,

ультразвуковые детекторы, приборы для измерения индикаторного давления [19,20].

Основные методы диагностики ДВС применяемые на АЭС в настоящее время:

*Контроль основных параметров технического состояния.* Во время выполнения программы ступенчатого пуска ДГУ проводится проверка соответствия частоты вращения ротора, параметры тока, напряжения и мощности генератора. Данные проверки направлены на выявление грубых эксплуатационных дефектов и оценки общего технического состояния ДГУ [48].

При этом не предполагается решение таких задач как определение состояния отдельных узлов и деталей, оценка ресурса ДГУ [62,63].

*Спектральный анализ моторного масла.* Регулярно при опробовании ДГУ АЭС РФ проводится спектральный анализ моторного масла дизелей на предмет обнаружения следов разрушения. Данный метод позволяет выявить развитые дефекты узлов и деталей дизеля только на стадии их разрушения [51].

*Химический анализ выхлопных газов.* При плановом опробовании ДГУ АЭС входящих в состав РДЭС проводится химический анализ сажи на предмет наличия продуктов неполного сгорания [51, 55].

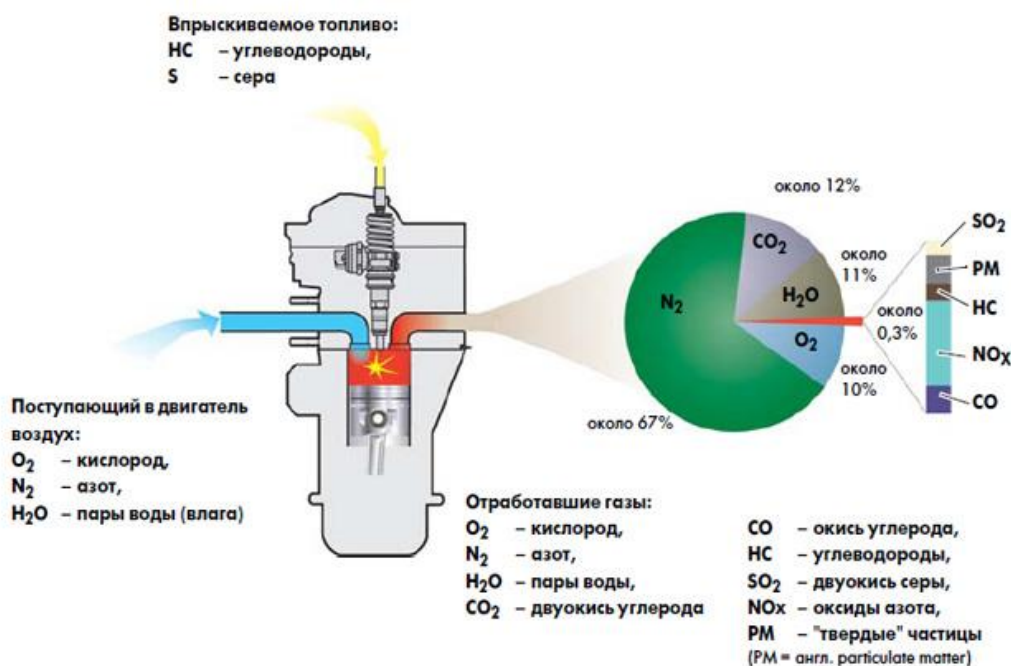


Рисунок 1.5 – Химический анализ выхлопных газов

Данный тест является косвенным методом определения отклонения ФУОВТ, а также износа уплотнительных колец поршневых цилиндров. Этот метод не является точным и не предполагает возможность определения конкретной группы оборудования, в которой происходит отклонение или износ.

*Метод индикаторных диаграмм.* Одним из достаточно чувствительных методов можно отметить метод, основанный на снятии индикаторных диаграмм [13].

Данный метод позволяет провести измерение давления в цилиндрах дизеля на протяжении рабочего цикла и определить такие серьезные эксплуатационные показатели, как опережение фактического угла отклонения впрыска (подачи) топлива (ФУОВТ), неравномерность вращения коленвала, состояние цилиндропоршневых групп (ЦПГ), исправность топливной системы, системы подачи воздуха.

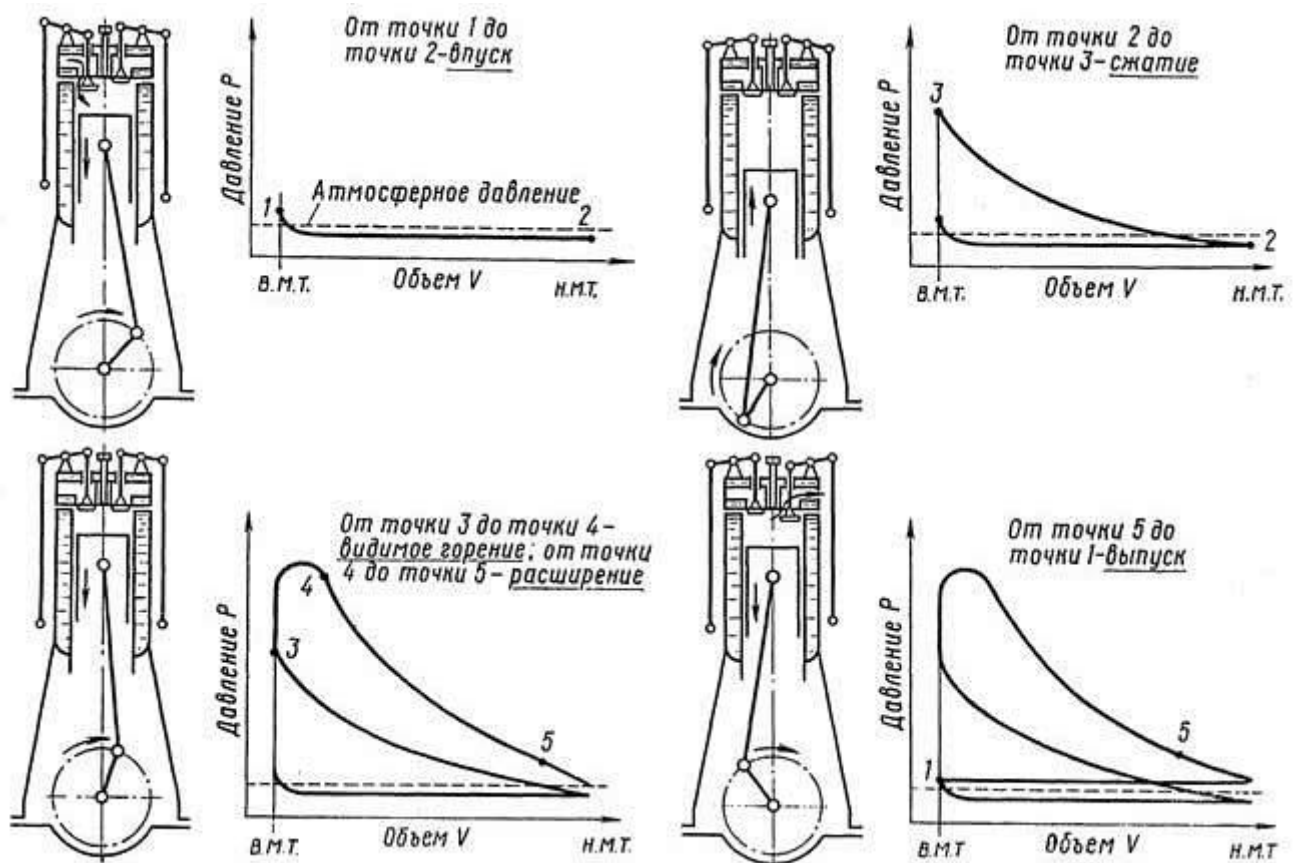


Рисунок 1.6 – Графическое изображение отдельных участков индикаторной диаграммы для дизеля без наддува и соответствующие положения поршня в цилиндре

Однако измерение давления в цилиндрах возможно не для всех конструкций дизелей, так как для выполнения данной процедуры необходимо наличие индикаторных кранов цилиндров. Конструкция большинства дизелей, эксплуатируемых на АЭС РФ, не позволяет внедрить данный метод.

*Тепловизионный контроль.* Широко распространенным для большинства дизелей, эксплуатируемых на АЭС РФ, является метод тепловизионного контроля (ТВК) [11, 56]. Основной задачей ТВК является выявление отклонений температурных показателей отдельных узлов и деталей. ТВК имеет большое значение для оценки качества организации теплового процесса ДГУ. Результаты, получаемые методом ТВК могут быть не достоверны. Данный метод является одним из основных методов диагностики ДГУ. Применение инфракрасной диагностики регламентируется РД 153-34.0-20.364 «Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования». Однако достоверность метода зависит от степени загрузки и времени работы дизеля.

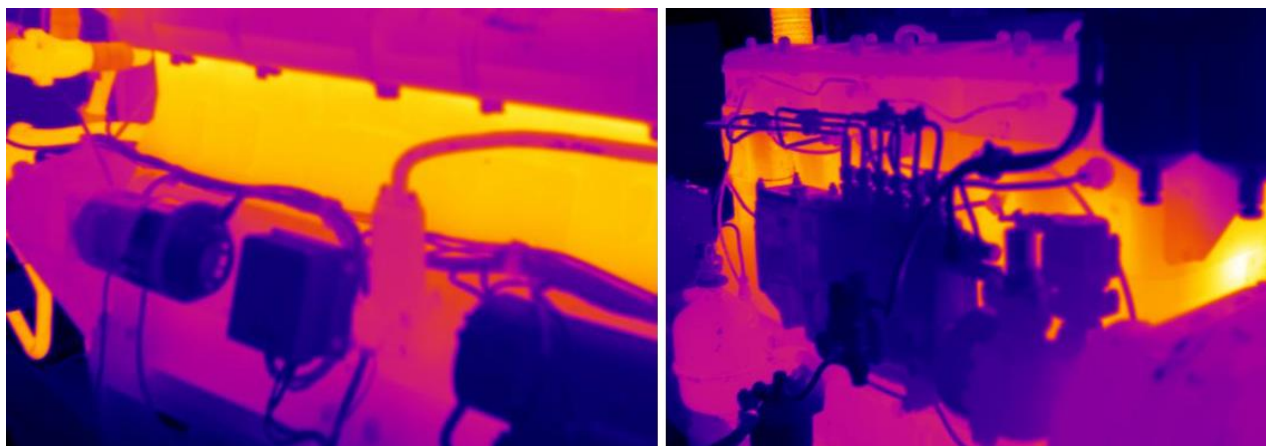


Рисунок 1.7 – Использование тепловизионного контроля

Проведение тепловизионного контроля дизеля позволяет вовремя выявить дефекты элементов топливной аппаратуры, которые не обеспечивают необходимый рабочий процесс, что дает возможность оперативно восстановить необходимые мощностные, экономические и экологические характеристики дизеля. Контроль температурного состояния остова дизеля и его основных агрегатов позволяет выявить места с резко выраженным изменением температурного поля, что очевидно является следствием повышенного сопротивления в сопрягаемых узлах.

*Вибродиагностика.* Для дизелей, эксплуатируемых на некоторых АЭС РФ, таких как Смоленская АЭС и Ростовская АЭС проводится вибродиагностика. Данный метод решает широкий спектр задач, таких как определение общего состояния ДГУ и возможности ее эксплуатации, выявление дефектов отдельных узлов и деталей, определение неравномерности вращения коленвала [9, 10].

Данный метод является одним из основных методов диагностики ДГУ, применяемых на АЭС. Применение вибрационной диагностики для ДГУ различной мощности и конструкции регламентировано ГОСТ 31349-2007 «Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 9. Измерение и оценка механической вибрации». Измерение и оценка механической вибрации ДГУ проводятся заводом-изготовителем [70]. Результаты испытаний предоставляются заказчику в установленном порядке. Результаты последующих измерений вибрации данной ДГУ сопоставляются с заводскими испытаниями.

Относительная сложность данного метода связана с необходимостью регистрации вибрационного сигнала в трех проекциях [16].

Контроль уровня вибрации в точках на корпусе дизеля и генератора с последующим сравнением параметров вибрации с их нормативными значениями, определенными для машин данной конструкции позволяет сделать вывод о возможности дальнейшей эксплуатации ДГУ. Сравнение текущих данных с результатами заводских испытаний позволяет установить тенденцию технического состояния.

*Контроль ультразвуковых параметров.* Для большинства дизелей, эксплуатируемых на АЭС РФ, проводится контроль состояния ультразвуковым методом [14, 15].

Данный метод является наиболее универсальным и решает широкий круг задач, таких как:

- определение отклонения ФУОВТ;
- определение износа уплотнительных колец поршневых цилиндров;

- определение зазоров в сочленении поршень-цилиндр;
- выявление дефектов подшипников на ранних стадиях развития;
- определение тенденции состояния ДГУ;
- прогнозирование состояния ДГУ.

### 1.2.3 Показатели эффективности современных систем диагностики дизель-генераторного оборудования

На АЭС РФ также на текущий момент существует возможность проведения диагностики ДГУ комплексами «Магистраль-У», «Дизель-Адмирал-ХХ» и «Садко-М».

Комплексы «Магистраль У» и «Дизель-Адмирал-ХХ» ориентированы на настройку и регулировку топливоподачи и газораспределения для достижения максимальной эффективности работы дизельной установки, экономии топлива и масла, обеспечения максимальной продолжительности эксплуатации дизеля. Но эти комплексы не охватывают всех параметров, отвечающих за надежную и безопасную работу дизель-генератора (не контролируют вибрации деталей дизеля, работу подшипниковых узлов и других трущихся узлов, температуры многих зон установки — всего того, что необходимо для предотвращения отказов и поломок ДГУ).

Основное назначение комплекса «Садко-М» — обеспечение непрерывного (до нескольких часов) синхронного многоканального сбора, регистрации и хранения данных о вибрационном состоянии. Комплекс «Садко-М» ориентирован на анализ вибрационного состояния и предназначен, главным образом, для балансировки вращающихся механизмов.

По результатам анализа систем – «Дизель-Адмирал-ХХ», «Магистраль У», «Садко-М» и штатной системы САУ ДГ – с точки зрения полноты диагностирования сорока трех наиболее значимых дефектов выявлено [52]:

- «Дизель-Адмирал-ХХ» и «Магистраль У» способны выявлять 37% наиболее значимых дефектов;
- «Садко-М» способен выявлять 60% наиболее значимых дефектов;
- штатная система САУ ДГ способна выявлять 65% наиболее



значимых дефектов.

Анализ был проведен предприятием по обеспечению работоспособности технологического оборудования «Ресурс» (ООО «Ресурс»).

В итоге можно сделать вывод, что процедуры обследования ДГУ, выполняемые в настоящее время оперативным персоналом АЭС, имеют ряд недостатков, отмеченных в работах [50,51], таких как:

- отсутствие унификации методов и средств диагностирования, использование различных средств регистрации и обработки данных на каждой из АЭС РФ;
- выявление лишь грубых эксплуатационных дефектов ДГУ без анализа качества настройки и тенденции изменения его состояния;
- сложность оценки ресурса оборудования, как следствие, невозможность обоснованного продления срока эксплуатации;
- необходимость повышения качества диагностирования в связи с переходом АЭС на 18-месячный топливный цикл и увеличения межремонтного периода.

Для проведения процедуры полного диагностирования необходимо выполнить следующие действия:

- зарегистрировать данные (ТВК, УЗК, ВК, ИД);
- определить диагностические параметры;
- сгруппировать полученные параметры с другими по принципу соответствия конструкции диагностируемого объекта, режима работы объекта, режима регистрации, принадлежности к типовой группе.

Эти действия дадут возможность обеспечить обобщенную проверку механизма дизеля и генератора с точки зрения возможности их эксплуатации.

Таким образом, мы можем выявить необходимое количество данных которое должно включать записанные текущие сигналы вибродиагностики, теплодиагностики, ультразвуковой диагностики, параметры давления, а также сигналы, записанные на заведомо исправном оборудовании того же типа [50].

Учитывая вышеизложенное можно утверждать, что для осуществления комплексной оценки состояния ДГУ с использованием опыта разработки и эксплуатации локальных диагностических систем требуется проведение исследования возможности построения многоканальной информационно-диагностической системы, использующей современные методы обработки диагностической информации.

### 1.3 Цель и задачи исследования

Современные информационно-измерительные системы диагностики ДГУ позволяют получать диагностическую информацию только в ограниченных рамках отдельных методов и средств, в основном направленных на выявление дефектов, возникающих в следствии износа оборудования. ДГУ в составе РДЭС имеют довольно низкий износ, так как в работе они находятся довольно непродолжительное время. Также важно отметить постепенный переход АЭС на 18-месячный топливный цикл и увеличении межремонтного периода, что влечет за собой ужесточение требований к качеству диагностирования оборудования важного для безопасности. Отсюда следует, что для диагностики ДГУ РДЭС необходимо применять несколько методов в комплексе. Основные аттестованные на АЭС используемые при пробных пусках методы, необходимо объединить в одной структуре — это вибрационный контроль, тепловизионный контроль, контроль ультразвуковых параметров и контроль индикаторных диаграмм.

При проведении вибрационного контроля необходимо обеспечить обобщенную проверку механизма дизеля и генератора с точки зрения возможности их эксплуатации.

Проведение тепловизионного контроля дизеля позволяет вовремя выявить дефекты элементов топливной аппаратуры, которые не обеспечивают необходимый рабочий процесс, что дает возможность оперативно восстановить необходимые мощностные, экономические и экологические характеристики дизеля. Контроль температурного состояния остова дизеля и его основных агрегатов позволяет выявить места с резко выраженным изменением

температурного поля, что очевидно является следствием повышенного сопротивления в сопрягаемых узлах.

Таким образом, чтобы объединить эти методы диагностирования требуется разработка некоторого аппаратно-программного комплекса обеспечивающего диагностирование ответственных элементов конструкций ДГУ, который должен обеспечить проведение вибрационного, тепловизионного контроля, контроля УЗП и контроля ИД. Программная часть комплекса должна обеспечивать комплексный анализ термограмм; расчет параметров вибрационных и ультразвуковых сигналов: среднеквадратических значений (СКЗ), размаха, пик-фактора, огибающей и спектра, их сравнение с нормативными и эталонными значениями, результатами предыдущих измерений.

Для отслеживания тенденции изменения диагностических параметров оборудования необходимо создание базы данных параметров основных конструкций дизелей, эксплуатируемых на АЭС РФ.

Данный комплекс, должен обладать способностью проводить диагностирование ДГУ синхронно различными способами (ВК, УЗК, ТВК, ИД), а также собирать диагностическую информацию в единую базу данных, для возможности ее обработки и прогнозирования состояния, исследуемых ДГУ с увеличенным до 18 месяцев межремонтным периодом.

**Целью работы** является повышение безопасности эксплуатации АЭС за счет использования разработанных информационно измерительных диагностических систем мониторинга технического состояния установок аварийного питания (далее ИИДС).

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**:

- сравнительный анализ методов и средств диагностики оборудования аварийного питания АЭС;
- исследование процессов диагностирования оборудования обеспечивающих повышение эффективности диагностических процедур;

- анализ методов обработки диагностической информации позволяющих обеспечить выявление дефектов на более ранних этапах их развития;
- разработка программного обеспечения, обеспечивающего проведение диагностической информации в автоматизированном режиме;
- проведение экспериментальных исследований и внедрение ИИДС в опытно-промышленную эксплуатацию.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 2.1 Принципы построения информационно-измерительных диагностических систем сложных технических объектов

#### 2.1.1 Критерии эффективности ИИДС

В основу построения ИИДС заложены фундаментальные принципы, сформулированные в положениях двух теорий – теории контролеспособности и теории обнаружения [21]. Технические требования к ИИДС регламентируются национальным стандартом [68] и определены как многопараметрический мониторинг эксплуатационной повреждаемости. К основным критериям при построении структуры ИИДС определяющими эффективность систем диагностики принято относить [22]:

- 1) Полноту поиска неисправности.
- 2) Вероятность ложного обнаружения неисправности.
- 3) Вероятность пропуска дефекта.

Полнота поиска неисправности – характеристика определяющая возможность выявления отказов в объекте при выбранном методе его диагностирования.

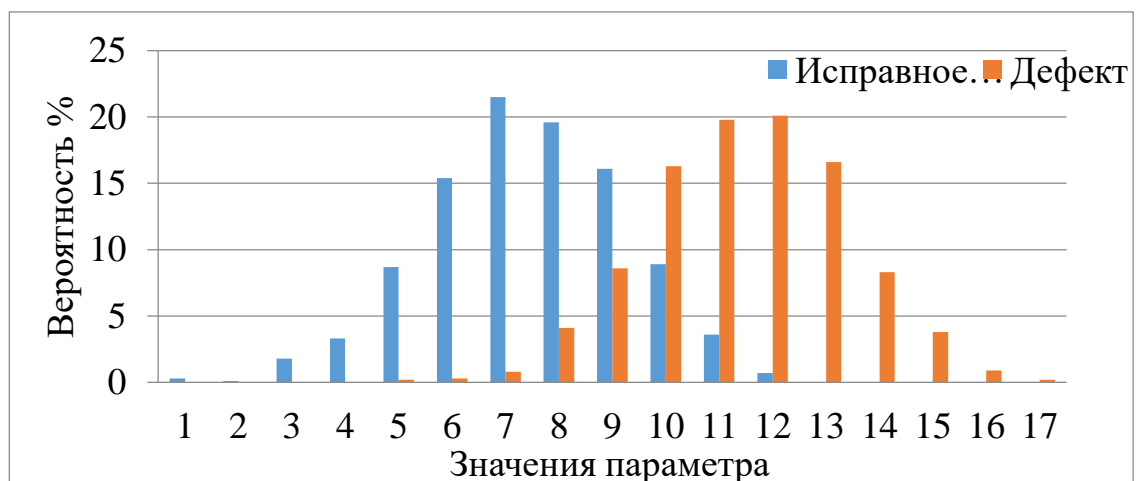


Рисунок 2.1 - Гистограмма распределения плотности вероятностей значений диагностического сигнала

Оценка вероятности пропуска дефекта требует проведения серии экспериментов, соответствующих исправному и дефектным состояниям (рисунок 2.1) [29]

Области, в которых параметры совпадают, соответствуют вероятностям ошибок. В данном примере вероятность пропуска дефекта оценивается 14%, а вероятность ложной тревоги 13,2%. Принято считать [31], что если вероятность ошибок выше 30% то данный метод диагностики не может считаться эффективным.

В данной работе рассмотренные выше критерии эффективности ИИДС предлагается дополнить информационными критериями, формирующими количественные требования к информационным преобразованиям в системах [25]. К наиболее важным можно отнести:

- 1) Идентифицируемость, под которой понимается возможность отождествления дефекта по результатам диагностируемой процедуры.
- 2) Изолируемость – степень проявления генераций, вызванных влиянием дефекта в диагностических сигналах.

На этапе проектирования ИИДС необходимо формализовать различные трансформации, через которые проходят диагностические измерения, прежде чем будет получено диагностическое заключение [30] (рисунок 2.2).

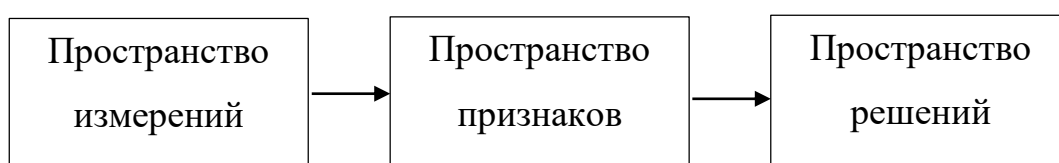


Рисунок 2.2 – Последовательность информационных преобразований результатов диагностических измерений

Пространство признаков - это пространство векторов  $y(y_1, \dots, y_i)$ , где  $y_i$  -  $i$ -й признак, полученный как функция измерений с использованием априорного знания задачи. Здесь измерения анализируются и объединяются с помощью априорного знания процесса для извлечения наиболее значимых с точки зрения диагностирования характеристик процесса. Отображение из пространства признаков в пространство решений должно удовлетворять некоторой целевой

функции (например, минимизации ошибок классификации). Это преобразование достигается либо с помощью дискриминантной функции, либо в некоторых случаях, с помощью простых пороговых функций. Пространство решений - это пространство точек  $d=[d_1, \dots, d_k]$ , где  $k$  - число решающих переменных, полученных путем соответствующих преобразований пространства признаков.

Преобразования в пространстве решений выполняются с использованием пороговых функций, соответствия шаблону или символического рассуждения, в зависимости от обстоятельств [32].

Рассмотрим два способа построения пространства признаков из пространства измерений, а именно: выбор признаков и извлечение признаков. При анализе объекта диагностики выбирается несколько важных параметров исходного пространства измерений. Извлечение признаков - это процедура преобразования пространства измерений в пространство меньших размерностей. Например, при термографировании дизельно-генераторных установок вручную или автоматически идентифицируются температуры выхлопных патрубков цилиндров или по индикаторным диаграммам цилиндров определяют максимальное давление сжатия – это примеры выбора признаков. При вычислении СКЗ сигналов вибрации и ультразвука – случай извлечения признаков.

Преимущество преобразования пространства измерений в пространство признаков, заключается в упрощении последующей классификации. Анализ особенностей конструкции и функционирования технологической установки позволяет разработать эффективное отображение из пространства измерений в пространство признаков.

Преобразование данных из пространства измерения в пространство признаков выполняется с использованием априорных знаний об объекте, тогда как преобразование из пространства признаков в пространство решений реализуется как алгоритм поиска или обучения. Формирования мощного пространства признаков, позволяет значительно снизить нагрузку на алгоритм поиска / обучения.

Пространство решений обычно отображается в пространство классов с помощью простых пороговых функций.

Таким образом, эффективность системы диагностики определяется выбором диагностических признаков, т.е. представлением связи между состоянием и его проявлениями в сигналах датчиков.

Для представления признакового пространства можно использовать величины отклонений [29]. Под отклонениями понимаются несоответствия между фактическими значениями признаков и теми значениями, которые должны наблюдаться при нормальном функционировании объекта. Реакция датчика на дефект, выраженная как отклонение, может быть использована для построения пространства признаков. Отклонения должны быть близки к нулю, когда дефекты отсутствуют. В реальных ситуациях остаточные значения не равны нулю из-за шума измерений, технологического процесса, неточностей модели, ошибок в датчиках и др.

Построение признакового пространства требует некоторой степени избыточности. Существует два типа избыточности, аппаратная избыточность и аналитическая избыточность. Первый требует избыточных датчиков. С другой стороны, аналитическая избыточность (также называемая функциональной) достигается из функциональной зависимости между переменными процесса и обычно обеспечивается набором алгебраических отношений между состояниями, входами и выходами системы.

Дополнительные степени свободы, возникающие в результате избыточности, способствуют лучшей идентифицируемости и изолируемости.

Предполагается, что существуют наборы признаков, каждый из которых чувствителен к одному классу дефектов, при этом нечувствителен к остальным неисправностям и неизвестным входным сигналам. Основная идея заключается в том, что при наличии дефекта, все нечувствительные параметры демонстрируют лишь небольшие отклонения, а параметры, чувствительные к дефекту, будут значительно отклоняться и приводить к появлению невязок большой величины. Уникальная сигнатура неисправности обеспечивает её



надежную изоляцию. Показано [36], что наилучшей изолируемости можно добиться, когда при различных дефектах отклонения принимают положительные и отрицательные значения (например, когда СКЗ ультразвукового сигнала возрастает, а температура, зарегистрированная одновременно в той же точке, уменьшается).

Отклонения, учитываемые в системе, должны обеспечивать также и надежность в том смысле, что решения не искажаются такими неизвестными входными данными, как неструктурированные неопределенности и шум процесса измерения.

### 2.1.2 Исследование возможности использования принципа многоканальности в диагностических системах

В практических задачах построения информационно-диагностических систем необходимо учитывать пространственную распределенность элементов, составляющих объект диагностики. Многоканальность диагностической системы повышает степень полноты диагностирования за счет учета взаимосвязанных процессов в различных частях объекта.

Отразим рассмотренные требования и рекомендации применительно к задаче диагностики дизель-генераторных установок. Пространство измерений представлено сигналами  $n$  датчиков. Это пространство трансформируется в пространство признаков  $Y$ , которое представлено отклонениями диагностических параметров  $\Delta y_1 \dots \Delta y_n$  в результате действия дефектов. Пространство  $Y$ , обеспечивающее идентификацию  $m$  - классов состояний в общем виде, может быть описано моделью:

$$Y = \begin{pmatrix} \Delta y_1^1 & \dots & \Delta y_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta y_1^m & \dots & \Delta y_n^m \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Данная концепция моделирования может быть проиллюстрирована разработкой системы, обеспечивающей диагностику четырехцилиндрового дизеля. Предположим, что в двигателе могут возникнуть три группы дефектов:

неисправность форсунки, отклонение в цилиндропоршневой группе и неисправность подшипников КВ. Состояние двигателя оценивается четырьмя методами: вибрацией в шести точках корпуса (см. рисунок 2.3)  $x_{v1} - x_{v6}$ , ультразвуком в районе подшипников  $x_{u1} - x_{u4}$ , температурой выхлопных патрубков цилиндров  $x_{t1} - x_{t4}$  и давлением в цилиндрах  $x_{p1} - x_{p4}$ .

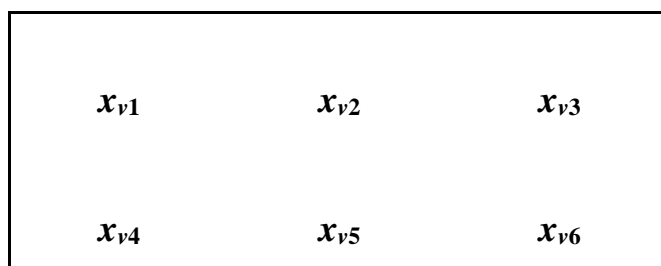


Рисунок 2.3 – Расположение точек контроля вибрации на схеме двигателя

Соответствующие параметры измеряются и преобразуются в диагностические признаки:  $y_{v1} - y_{v6}$ ,  $y_{u1} - y_{u4}$ ,  $y_{t1} - y_{t4}$ ,  $y_{p1} - y_{p4}$  – отклонения СКЗ сигналов вибрации и ультразвука, максимальных температур и давлений от номинальных значений в режиме нормального функционирования объекта.

Таблица 2.1 – Чувствительность датчиков к проявлению дефектов

Отклон. пар. № деф.	$y_{v1}$	$y_{v2}$	$y_{v3}$	$y_{v4}$	$y_{v5}$	$y_{v6}$	$y_{t1}$	$y_{t2}$	$y_{t3}$	$y_{t4}$	$y_{u1}$	$y_{u2}$	$y_{u3}$	$y_{u4}$	$y_{p1}$	$y_{p2}$	$y_{p3}$	$y_{p4}$
1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0	-0,1	0,1	0,1	0	0,1	0	0	0	-1	0,2	0	0
2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	-0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0,2	-1	0,2	0
3	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	-0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0,2	-1	0,2
4	0,1	0,2	0,3	0	0,1	0,2	0	0,1	0,1	-0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0,2	-1
5	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,1	-0,3	0,2	0,1	0	0,2	0,1	0,1	0,1	-1	0,2	0	0
6	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	-0,3	0,2	0,1	0	0,2	0	0,1	0,2	-1	0,2	0
7	0,3	0,4	0,4	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2	-0,3	0,2	0	0	0,2	0,1	0	0,2	-1	0,2
8	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0	0,1	0,2	-0,3	0	0	0	0,2	0	0	0,2	-1
9	0,1	0	0	0,2	0,1	0	0	0	0	0	0,9	0,2	0	0	0	0	0	0
10	0,1	0,1	0	0,2	0,2	0,1	0	0	0	0	0,2	0,8	0,2	0	0	0	0	0
11	0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0	0	0	0	0	0,2	0,7	0,2	0	0	0	0
12	0	0	0,1	0	0,1	0,2	0	0	0	0	0	0	0,2	0,6	0	0	0	0

На основе проведенных исследований получены данные приведенные в таблице 2.1, которая демонстрирует отображение 18-мерных векторов признаков в 12 классов состояний: неисправность форсунок 1-4 (№№ дефектов 1-4), отклонения в работе ЦПГ 1-4 (№№ дефектов 5-8), неисправность подшипников КВ 1-4 (№№ дефектов 9-12).

Ноль означает, что на датчик не влияют изменения состояния, а запись больше или меньше нуля означает, что датчик в той или иной степени чувствителен к соответствующему состоянию системы. Подобное представление системы учитывает:

- 1) среднюю чувствительность показателей вибрации к дефектам форсунок и ЦПГ;
- 2) низкую чувствительность показателей вибрации к дефектам подшипников;
- 3) влияние дефектов как на датчики вибрации, установленные как вблизи неисправной детали, так и в других областях;
- 4) в целом рост показателей вибрации при наличии любого дефекта;
- 5) среднюю чувствительность температурных параметров к дефектам ЦПГ;
- 6) низкую чувствительность температурных параметров к дефектам форсунок и подшипников;
- 7) снижение температуры неисправных ЦПГ и форсунок и одновременный рост температуры исправных форсунок и цилиндров;
- 8) низкую чувствительность параметров ультразвука к дефектам ЦПГ и форсунок;
- 9) высокую чувствительность ультразвуковых параметров к дефектам форсунок и подшипников;
- 10) влияние дефектов на ультразвуковые датчики, установленные вблизи неисправной детали, больше, чем на датчики в других областях;
- 11) в целом рост показателей ультразвука при наличии любого дефекта;
- 12) высокую чувствительность параметров давления к дефектам форсунок и ЦПГ;
- 13) отсутствие чувствительности параметров давления к дефектам подшипников снижение температуры неисправных ЦПГ и форсунок и одновременный рост температуры исправных форсунок и цилиндров;

14) снижение давления при неисправных ЦПГ и форсунках и одновременный рост давления в исправных и цилиндрах.

Как видно из таблицы 2.1, каждая неисправность характеризуется уникальным набором параметров. Каждую строку таблицы 2.1 можно рассматривать как координаты вектора в пространстве признаков, положение которого (с некоторым допуском) можно рассматривать как решение о принадлежности к одному из классов. Расстояние между соседними может рассматриваться в качестве меры изолируемости в отношении данных двух дефектов. Расстояние между двумя точками в  $n$ -мерном пространстве  $d_{ij}$  предложено [34] рассчитывать по формуле:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (\Delta y_k^i - \Delta y_k^j)^2}, \quad (2.2)$$

где  $\Delta y_k^i$  и  $\Delta y_k^j$  координаты соседних векторов.

Удаленность вектора от нулевой координаты характеризует степень идентифицируемости, которую может обеспечить система при диагностике одного из дефектов. Расстояние от начала координат до точки в  $n$ -мерном пространстве  $d_{0i}$  предлагается рассчитать по формуле:

$$d_{0i} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (\Delta y_k^i)^2}, \quad (2.3)$$

где  $i$  номер вектора.

Очевидно, что идентифицируемость у некоторых неисправностей меньше, чем у других, а также то, что некоторые вектора имеют близкие координаты, т.е. относительно низкую изолируемость.

Будем оценивать идентифицируемость по длине самого короткого вектора (соответствующего самому сложноидентифицируемому дефекту)  $d_{0\min}$ , а изолируемость по расстоянию между двумя самыми близкими векторами  $d_{\min}$ .

Достижимая идентифицируемость при использовании различных каналов рассматриваемой системы диагностики рассчитана по формуле 2.3.

### 2.1.3 Методика построения многоканальной ИИДС

С учетом приведенного анализа разработка структуры ИИДС с учетом критериев идентифицируемости и изолируемости при выявлении дефектов сводится к последовательности следующих действий:

1. Для задачи диагностирования оборудования проводится анализ чувствительности датчиков, измеряющих конкретные параметры.
2. Из таблицы проведенных измерений формируется  $n$ -мерный вектор диагностических параметров
3. Расстояние между двумя точками в  $n$ -мерном пространстве  $d_{ij}$  рассчитывается по формуле:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (\Delta y_k^i - \Delta y_k^j)^2}, \quad (2.2)$$

где  $\Delta y_k^i$  и  $\Delta y_k^j$  координаты соседних векторов.

4. Степень идентифицируемости характеризуется расстоянием от начала координат до соответствующей координаты в  $n$ -мерном пространстве:

$$d_{0i} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (\Delta y_k^i)^2}, \quad (2.3)$$

5. Идентифицируемость характеризуется длиной наиболее короткого вектора  $d_{0\min}$ .
6. Степень изолируемости оценивается величиной расстояния между двумя самыми близкими векторами  $d_{\min}$ .

Буквами  $v$ ,  $u$ ,  $t$ ,  $p$  обозначены каналы регистрации вибрации, ультразвука, температуры и давления. В таблице 2.2 рассматриваются варианты системы с одним типом первичных преобразователей, – вибрационных и ультразвуковых, – а также различные комбинации измерительных каналов, обеспечивающих два, три и все четыре вида измерений. Каналы регистрации температуры и давления не рассматриваются отдельно, поскольку из таблицы 2.1 очевидно, что сами по

себе они не могут обеспечить идентифицируемость всех состояний в системе диагностики. Рассчитав идентифицируемость всех состояний, можно выбрать наименьшие значения (последняя строчка).

Таблица 2.2 - Идентифицируемость при использовании различных каналов системы диагностики

Идентифицируемое состояние \ Задействованные измерительные каналы	Идентифицируемость											
	$v$	$u$	$u+p$	$v+t$	$v+u$	$u+p$	$u+t$	$t+p$	$u+p+v$	$u+p+t$	$v+t+u$	$v+t+u+p$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Неисправность форсунки1	0,44	0,1	1,02	0,47	0,45	0,93	0,2	1,03	1,02	0,94	0,48	1,04
Неисправность форсунки2	0,56	0,14	1,01	0,59	0,57	0,86	0,24	1,03	1,02	0,88	0,61	1,04
Неисправность форсунки3	0,56	0,17	0,94	0,59	0,58	0,77	0,26	0,96	0,95	0,8	0,62	0,97
Неисправность форсунки4	0,44	0,2	0,77	0,47	0,48	0,66	0,26	0,79	0,79	0,69	0,51	0,81
Отклонения в работе ЦПГ 1	0,66	0,26	1,13	0,75	0,71	0,96	0,46	1,19	1,16	1,03	0,8	1,22
Отклонения в работе ЦПГ 2	0,79	0,22	1,16	0,9	0,82	0,88	0,48	1,24	1,18	0,97	0,93	1,26
Отклонения в работе ЦПГ 3	0,79	0,22	1,1	0,9	0,82	0,79	0,48	1,17	1,12	0,89	0,93	1,2
Отклонения в работе ЦПГ 4	0,66	0,2	0,91	0,75	0,69	0,66	0,42	0,98	0,93	0,76	0,78	1
Неисправность подшипников KB1	0,24	0,92	0,24	0,24	0,95	0,92	0,92	0,24	0,95	0,92	0,95	0,95
Неисправность подшипников KB 2	0,33	0,85	0,33	0,33	0,91	0,85	0,85	0,33	0,91	0,85	0,91	0,91
Неисправность подшипников KB 3	0,33	0,75	0,33	0,33	0,82	0,75	0,75	0,33	0,82	0,75	0,82	0,82
Неисправность подшипников KB 4	0,24	0,63	0,24	0,24	0,68	0,63	0,63	0,24	0,68	0,63	0,68	0,68
Наименьшее $d_{0i}$	0,24	0,1	0,24	0,24	0,45	0,63	0,2	0,24	0,68	0,63	0,48	0,68
$\sum_{j=1}^M d_{0i}$	6,04	4,66	9,18	6,56	8,48	9,66	5,95	9,53	11,53	10,11	9,02	11,9

В качестве систем, обеспечивающих приемлемую идентифицируемость, принято рассматривать те, у которых этот показатель не ниже 50%. Варианты №№ 1-4, 7 и 8 нуждаются в доработке. Прототипами системы №7 могут являться комплексы «Адмирал» [50] и «Магистраль» [51], основанные на регистрации и обработке показателей давления и температуры. Данные системы являются хорошими инструментами настройки и диагностики дефектов форсунок и ЦПГ, но не позволяют идентифицировать дефекты подшипников, хотя данная группа дефектов нередко приводит к отказам оборудования.

Анализ идентифицируемости указывает на близкие значения этих показателей у четырех систем (№ 6, 9, 10, 12). Для выбора между 14- и 18-канальными системами проведем сравнение по показателю изолируемости. Для этого рассчитаем изолируемость каждой пары состояний, достигаемую при работе различных систем, по формуле 3. Результаты анализа систем 9 и 12 представлены в таблицах 3 и 4.

Согласно данным таблицы 2.3, наибольшую сложность вызывает разделение дефектов форсунок: состояния №№ 1-4 имеют близкие координаты в пространстве состояний. Также проблемой является различие дефектов форсунок и цилиндров (пары 1 и 5, 2 и 6).

Данные в таблице 2.4 показывают, что введение дополнительных каналов температуры существенно повышает вероятность разделения дефектов форсунок, однако различие состояний 1 и 5, 2 и 6 является проблематичным, несмотря на использование всех восемнадцати измерительных каналов. Обе системы за счет ультразвуковых каналов обеспечивают идентификацию и локализацию дефектов подшипников.

Таблица 2.3 – Изолируемость состояний в системе, содержащей канал измерения ультразвука, давления и вибрации

Изолируемые состояния	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	0,37	0,48	0,46	0,46	0,71	0,75	0,62	0,89	0,89	0,88	0,81
2	0,37	-	0,36	0,48	0,48	0,39	0,66	0,62	0,94	0,84	0,87	0,84
3	0,48	0,36	-	0,37	0,37	0,63	0,4	0,59	0,97	0,84	0,76	0,79
4	0,46	0,48	0,37	-	0,58	0,73	0,69	0,39	0,95	0,84	0,71	0,63
5	0,39	0,56	0,58	0,58	-	0,79	0,73	0,66	0,95	0,91	0,91	0,91
6	0,71	0,39	0,63	0,73	0,79	-	0,8	0,73	1,2	0,96	1,01	1
Изолируемые состояния	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	0,75	0,66	0,4	0,69	0,73	0,8	-	0,78	1,25	1,1	0,88	0,93
8	0,62	0,62	0,59	0,39	0,66	0,73	0,78	-	1,18	1,08	0,92	0,77
9	0,89	0,94	0,97	0,95	0,95	1,2	1,25	1,18	-	0,96	1,2	1,16
10	0,89	0,84	0,84	0,84	0,91	0,96	1,1	1,08	0,96	-	0,85	1,06
11	0,88	0,87	0,76	0,71	0,91	1,01	0,88	0,92	1,2	0,85	-	0,69
12	0,81	0,84	0,79	0,63	0,91	1	0,93	0,77	1,16	1,06	0,69	-
Наименьшее $d_{ij}$	0,37	0,36	0,36	0,37	0,37	0,39	0,4	0,39	0,89	0,84	0,69	0,63

Следует отметить, что системы, забракованные по параметру идентифицируемости, также уступают по показателю изолируемости. Так, в

системе с одними ультразвуковыми каналами этот показатель для дефектов №№1-4 не превышает 0,2.

Таблица 2.4 – Изолируемость состояний в системе, содержащей канал измерения ультразвука, давления, вибрации и температуры

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	1,55	1,25	1,21	0,39	1,66	1,38	1,28	1,28	1,28	1,27	1,22
2	1,55	-	1,42	1,13	1,6	0,39	1,52	1,19	1,26	1,19	1,21	1,2
3	1,25	1,42	-	1,28	1,3	1,51	0,4	1,36	1,23	1,13	1,07	1,09
4	1,21	1,13	1,28	-	1,26	1,26	1,4	0,39	1,14	1,05	0,95	0,89
5	0,39	1,6	1,3	1,26	-	1,69	1,37	1,3	1,33	1,3	1,29	1,29
6	1,66	0,39	1,51	1,26	1,69	-	1,59	1,25	1,47	1,28	1,32	1,31
7	1,38	1,52	0,4	1,4	1,37	1,59	-	1,45	1,46	1,33	1,16	1,2
8	1,28	1,19	1,36	0,39	1,3	1,25	1,45	-	1,34	1,25	1,12	0,99
9	1,28	1,26	1,23	1,14	1,33	1,47	1,46	1,34	-	0,96	1,2	1,16
10	1,28	1,19	1,13	1,05	1,3	1,28	1,33	1,25	0,96	-	0,85	1,06
11	1,27	1,21	1,07	0,95	1,29	1,32	1,16	1,12	1,2	0,85	-	0,69
12	1,22	1,2	1,09	0,89	1,29	1,31	1,2	0,99	1,16	1,06	0,69	-
Наименьшее $d_{ij}$	0,39	0,39	0,4	0,39	0,39	0,39	0,4	0,39	0,96	0,85	0,69	0,69

Очевидно, выбор системы с наибольшим числом каналов регистрации обеспечивает наилучшее качество диагностирования.

Выбор конкретного варианта системы диагностирования дизельно-генераторных установок в настоящее время базируется на использовании следующих подходов: мониторинг вибрации [53], анализа химсостава отработанного масла [57], контроль индикаторного давления в цилиндре [54], контроль мгновенной угловой скорости маховика [59], ультразвуковой контроль [52], мониторинг выхлопных газов [52]. Данные методы в целом отвечают требованиям идентифицируемости, однако требованиям изолируемости за счет локализации дефектов с привязкой к конкретному узлу объекта по данным работы [51] отвечают только вибрационный, ультразвуковой, температурный методы и метод измерения давления в цилиндрах.

Мониторинг вибрации получил широкое распространение благодаря чувствительности к большинству дефектов, однако этот метод оставался довольно ограниченным в применении к дизельным двигателям, в основном из-за сложности сигналов вибрации, которые формируются под действием



различных источников и соответствующими путями передачи от источников к месту регистрации.

Ультразвуковой (звуковой) метод обладает преимуществами перед вибрационным подходом – большей чувствительностью к локальным процессам, отстройкой от влияния процессов в узлах смежных с контролируемым. Эти преимущества позволяют локализовать дефекты подшипников и цилиндров [51]. Метод используется не так широко, поскольку сигналы слабее, чем сигналы вибрации и быстро затухают при удалении от источника.

Проведение температурного контроля дизеля позволяет вовремя выявить дефекты элементов топливной аппаратуры. Контроль температурного состояния остова дизеля и его основных агрегатов позволяет выявить места с резко выраженным изменением температурного поля, что в отдельных случаях позволяет локализовать дефекты подшипников.

Давление в цилиндре как функция угла поворота коленчатого вала (КВ) и тактов сжатия в цикле двигателя используется для получения количественной информации о топливной аппаратуре и состоянии цилиндропоршневых групп (ЦПГ) [51]. Однако методы измерения давления в цилиндрах не всегда подходят для использования в двигателях, находящихся в эксплуатации, поскольку они дороги, сложны в обслуживании или калибровке.

Таким образом, структурная схема ИИДС для диагностики состояния ДГУ имеет четыре измерительных канала (без учета пространственной распределенности объекта), и соответствует традиционной схеме автоматизированной системы, и ее функциональная ориентация обеспечивается оригинальными методами обработки информации [43].

## 2.2 Совершенствование методики обработки диагностической информации многоканальных информационно-измерительных систем

### 2.2.1 Методика преобразования диагностических сигналов в многомерном измерительном пространстве главных компонент

В соответствии с принятой последовательностью информационных преобразований (Рисунок 2.2) пространство решений обеспечивается методами обработки, учитывающими многомерность пространства представления диагностических данных.

Анализом существующих алгоритмов обработки данных при диагностике неисправностей дизельных двигателей [66] установлено, что подавляющее большинство результатов получено при обработке сигналов вибрации [53]. В этих системах в основном используют различные частотные методы обработки сигналов, такие как быстрое преобразование Фурье, вейвлет-декомпозиция, кумулянтные спектры и др.

Поясним суть проблемы визуализации диагностической информации. Допустим мы имеем дело с сигналом одного диагностического параметра  $U$ . Изменение во времени эталонного (соответствующего исправному состоянию) имеет вид  $U_0$ , а сигнал текущего диагностического измерения  $U_1$  (Рисунки 2.4-2.6).

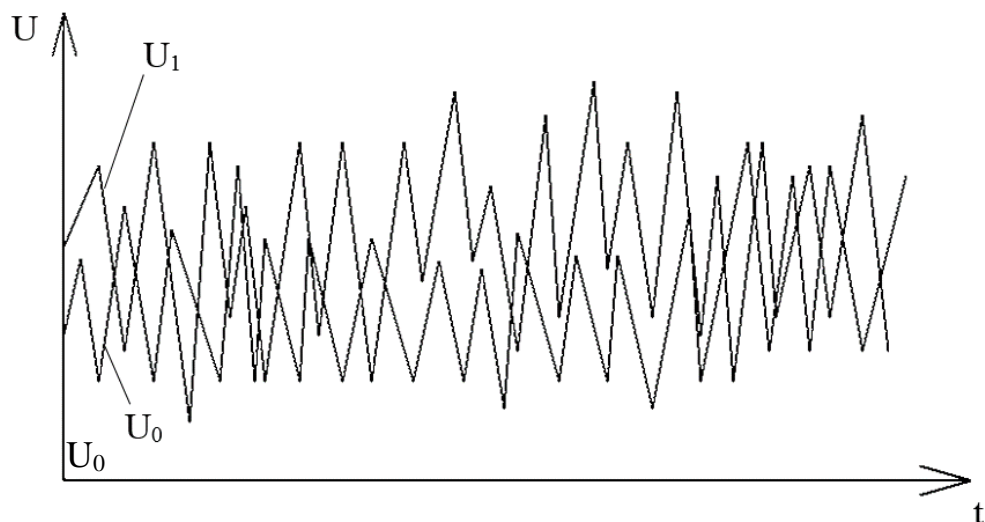


Рисунок 2.4 – Варианты диагностических сигналов

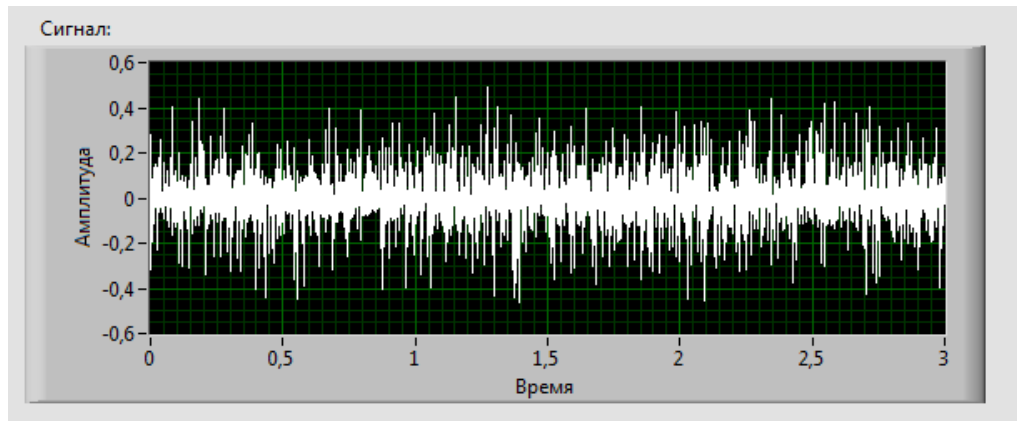


Рисунок 2.5 – Фрагмент исследуемого сигнала вибрации

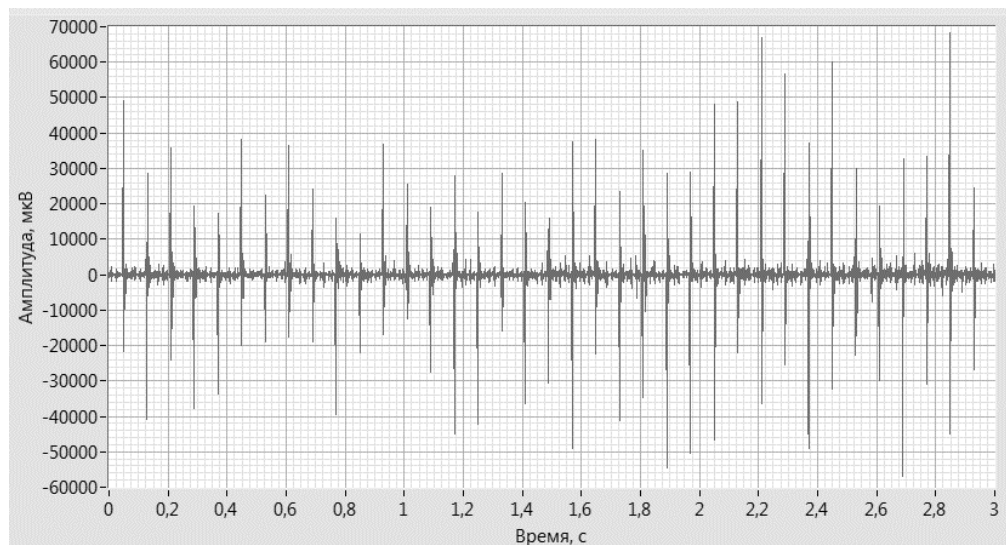


Рисунок 2.6 – Фрагмент исследуемого ультразвукового сигнала

Очевидно, что в местах наложения сигналов в  $U_0$  и  $U_1$  возможно появление ошибочных диагностических заключений. В статистической теории обнаружения, как уже было указано, подобные ошибки оценивают вероятностями пропуска или ложного обнаружения. Уровень влияния данных ошибок на диагностическое заключение можно снизить методами фильтрации данных или используя методы статистической обработки.

В пространстве распределения плотностей вероятностей сигналов это представляется изменением взаимного положения кривых плотностей вероятности (рисунок 2.7).

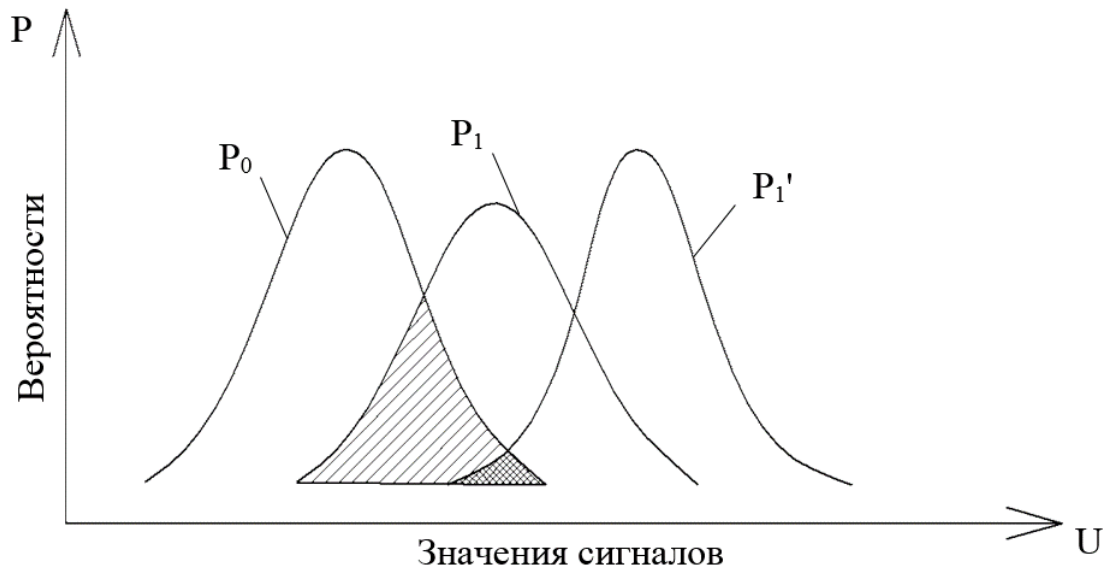


Рисунок 2.7 – Плотности распределения значений вероятности диагностических сигналов:  $P_0$  – сигнал без дефекта;  $P_1$  – сигнал с дефектом;  $P_1'$  – обработанный сигнал; заштрихованные области определяют вероятности ошибок обнаружения

Очевидно, что если анализируются несколько сигналов, то задача подготовки диагностического заключения усложняется и во многих случаях делается невозможной. Поэтому в данной работе была разработана специальная методика обработки диагностической информации, использующая положения теорий кластерного анализа и обнаружения. Пример отображения диагностической информации в многомерном пространстве представлен на рисунке 2.8.

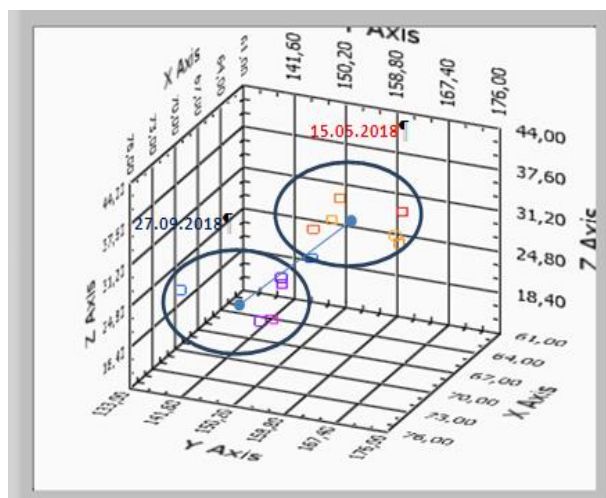


Рисунок 2.8 – Отображение диагностической информации в многомерном пространстве

Подходы, представленные в работах [35, 46], могут быть использованы при визуализации диагностических сигналов ДГУ. В настоящей работе поставлена задача обеспечения комплексной обработки данных различной физической природы и повышения наглядности представления результатов диагностирования за счет применения методов, снижающих размерность диагностической информации.

Исследования, обосновывающие возможность повышения эффективности традиционных методов визуализации диагностической информации, были проведены совместно с Е.А. Абидовой [17,23,24,28,29]. Задача использования метода главных компонент (МГК) состоит в том, чтобы выявить отклонения параметров в пространствах, которые имеют гораздо меньшую размерность, чем исходный набор данных, при этом могут достоверно описать основные свойства исследуемого объекта. МГК основан на ортогональном разложении ковариационной матрицы параметров системы по направлениям, которые описывают максимальное изменение данных.

### **Методика преобразования диагностических сигналов в многомерном измерительном пространстве**

В основе методики заложено использование сингулярного разложения [50]. Сингулярное разложение – численный метод, позволяющий разложить матрицу  $[X]$  ранга  $R$  на три матрицы:  $[Q]$  (ортогональная матрица),  $[D]$  (диагональная матрица) и  $[G]^T$  (транспонированная ортогональная матрица  $[G]$ ).

$$[X]_{a \times b} = [Q]_{b \times b} [D]_{b \times a} [G]_{a \times a}^T, \quad (2.5)$$

где  $Q^T Q = 1$  и  $G^T G = 1$ ,  $D$  – диагональная матрица, содержащая квадратные корни собственных значений  $X^T X$ , которые могут быть представлены как

$$D = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_L),$$

где  $R = \min(a, b)$ . Эти  $\sigma_i$  ( $i=1, 2, \dots, R$ ) – собственные значения матрицы  $[X]$ . Собственное число определяет значимость соответствующей ей компоненты.

Большинство измеренных сигналов, как показывает практика, являются временными рядами. В данной работе к сигналу для представления его в виде матрицы  $[X]$  была применена операция ганкелизации [32]. Например, Ганкелева матрица для дискретного сигнала вибрации  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) может быть получена с помощью скользящего окна длиной  $a$  следующим образом:

$$[X] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_b \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{b+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_a & x_{a+1} & \dots & x_N \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

где  $N = a+b-1$ .

Выбор числа столбцов матрицы  $n$  производится произвольно, но в рамках решения практических задач лучше всего принять  $n = \frac{N}{2}$  [28]. Ганкелева матрица (2.6) использована в уравнении (2.5) для сингулярного разложения

Метод главных компонент дает возможность получить матрицу  $[\bar{X}]$   $a \times b$  рангом  $r < R$ , которая отражает вклад наиболее значимых компонент:

$$[\bar{X}] = [O_r][D_r][G_r]^T, \quad (2.7)$$

где  $[\bar{X}]$  – реконструированная матрица, обычно использующая первые номера из сингулярных значений. Другие сингулярные значения соответствуют компонентам, вклад которых в исходный сигнал слабее.

$$\begin{aligned} \sigma_i &> \varepsilon, \quad i=1, \dots, r \\ \sigma_i &\leq \varepsilon, \quad i=r+1, \dots, R, \end{aligned} \quad (2.8)$$

где  $\varepsilon$  – порог значимости.

Применительно к диагностическим сигналам, компоненты, имеющие начальные номера могут и не содержать важную диагностическую информацию

[50]. И наоборот, компонента, содержащая информацию о дефекте, вероятно, будет иметь больший порядковый номер.

Главные компоненты (ГК), которые были выбраны из векторов матрицы  $O$ , полученной в результате разложения (2.5), задают базис, на который проецируются диагностические данные. Положение данных в базисе дает возможность судить о состоянии исследуемого объекта.

В классической форме метод главных компонент [34] предполагает использование всего массива данных (исправных и неисправных состояний) для построения базиса. Результаты, полученные при таком подходе, являются относительными. Применительно к нашему случаю более перспективным является метод предложенный И. Трендафиловой [35]. Данный метод предполагает изначальное построение базового эталонного пространства и последующее проецирование на него анализируемых данных. Исходными данными являются результаты диагностирования, соответствующие исправному состоянию. Эти данные должны быть представлены в виде матрицы. Выбор данных и их представление решается как самостоятельный вопрос в задаче диагностирования конкретного оборудования. Корректное применение МГК потребовало решения следующих задач:

- 1) выбор и представление данных для построения базового пространства;
- 2) выбор числа измерений базового пространства;
- 3) выбор меры соответствия между анализируемыми данными и данными, соответствующими исправному состоянию.

Для решения первой задачи предлагается [35] провести анализ нагрузок параметров, которыми характеризуется объект диагностирования, на главные компоненты. При чем, ГК в данном случае выбираются из векторов матрицы  $G$  разложения (2.5). Проверяемые параметры, по которым планируется построить базовое пространство, предварительно подвергаются нормировке, последующему сингулярному разложению и проецированию. В результате получается матрица нагрузок, первые колонки которой являются координатами

параметров в пространстве ГК. Положение параметров в пространстве ГК позволяет установить их относительную взаимосвязь и информативность. Близкие значения координат указывают на высокую степень корреляции между параметрами, которым соответствуют данные координаты. Расположение в ортогональных плоскостях говорит о независимости данных, а расположение в диагональных – об отрицательной корреляции.

Другая проблема применения МГК – выбор направлений базового пространства и их числа. В большинстве работ [25-27] данная проблема решается на основании анализа спектров собственных значений (ССЗ). Принято считать, что компоненты, отличающиеся наибольшими собственными значениями, в достаточной степени характеризуют массив данных. Однако логично предположить, что ССЗ выборки исправного и анализируемого состояния могут существенно различаться. Предположение основано на том, что влияние неисправности увеличивает вклад старших, компонент. В этой ситуации для обеспечения селективности целесообразно сравнить ССЗ и выбрать именно те компоненты, которым соответствует наибольшее различие собственных чисел.

Вопрос о мере соответствия анализируемых данных исправному состоянию связан с кластеризацией данных в базовом пространстве [37,38].

Проекции, соответствующие параметрам различных диагностируемых состояний, формируют два несовпадающих кластера, поскольку в исходном пространстве состояния характеризуются различными значениями параметров. Тогда для определения меры соответствия целесообразно определение центров кластеров и расстояния между ними на основе евклидовой меры.

При формировании нескольких различных кластеров, мерами соответствия могут быть евклидовы расстояния между центрами всех исправных и сопоставляемых кластеров.

Возможно также частичное совпадение проекций на ГК эталонной и анализируемой выборок. Для определения их различимости целесообразно применение элементов теории обнаружения и ошибок [33]. Подход предполагает построение функции плотности распределения вероятности (ФПРВ)



сравниваемых выборок: в описываемом случае – координат эталонной и анализируемой выборок в базовом пространстве. Сумма вероятностей при совпадении этих координат характеризует ошибки – пропуск дефекта (II) и ложную тревогу (I) (рисунок 2.9).

### 2.2.2 Кластеризация данных в диагностических процедурах

Таким образом, преобразования диагностических сигналов в соответствующие кластеры многомерного диагностического пространства сводится к последовательности следующих действий:

1. Исходный набор данных подвергается сингулярному разложению с получением соответствующих матриц  $[X]_{a \times b} = [Q]_{b \times b}[D]_{b \times a}[G]_{a \times a}^T$ .
2. При использовании метода главных компонент рассчитывается матрица  $[\bar{X}] = [O_r][D_r][G_r]^T$  отражающая вклад наиболее значимых компонент.
3. Проекция, соответствующие параметрам различных диагностируемых состояний, формируют соответствующие кластеры.
4. Сравнение координат эталонной и анализируемой выборок осуществляют по расстоянию между центрами соответствующих кластеров.

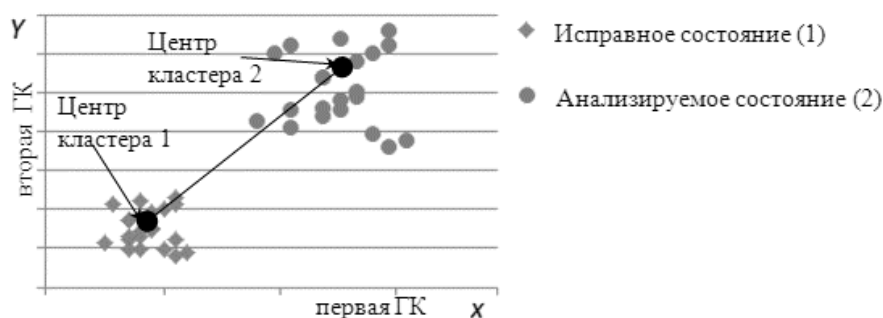


Рисунок 2.9 – Двумерное представление проекций данных на главные компоненты

Для реализации алгоритма совместного анализа параметров ДГУ различной физической природы получен эталонный базис, на который проецируются ультразвуковые и температурные параметры установки.

Формальное представление системы заключается в описании состояния объекта в многомерном пространстве. Каждое направление соответствует измеряемой физической величине - температура, вибрация, давление,

ультразвук. Таким образом, описываемое пространство является четырехмерным.

Численный эксперимент по исследованию системы на изменение состояния определяется отклонением её параметров от нормальных значений, принятых за единицу. Формула (2.9) описывает формирование  $i$ -го параметра при наличии дефекта, а формула (2.10) соответствует  $i$ -му параметру исправного дизеля:

$$x_i = 1 + r_i * e \quad (2.9)$$

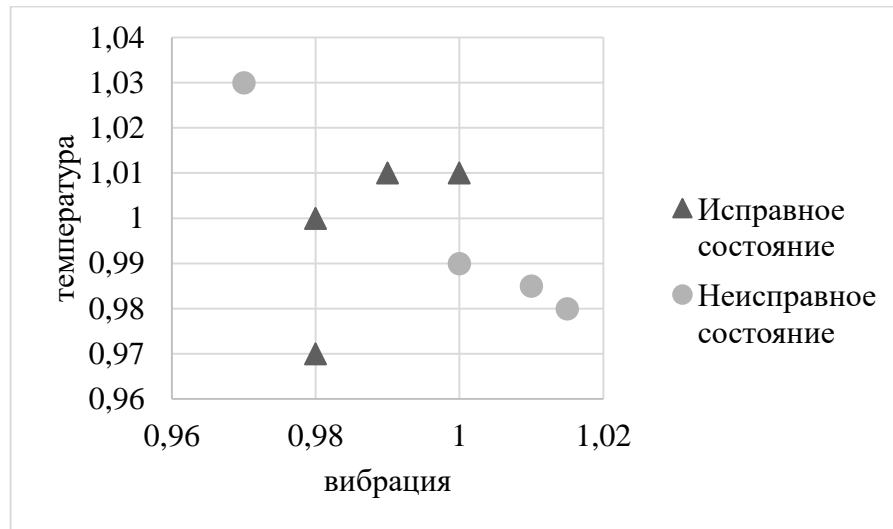
$$x_i = 1 + o_i * \dot{e} \quad (2.10)$$

где  $e$  – определяет степень развития дефекта и варьируется от 0,01 до 0,1,  $r_i$  – чувствительность параметра от -1 до 1 в зависимости от его природы и места измерения,  $o_i$  – случайное значение от -1 до 1, характеризующее погрешность при измерении и вычислении параметра,  $i$  меняется от 1 до 16,  $\dot{e}$  – коэффициент численно равный  $e$  (когда моделируется ранняя стадия развития дефекта).

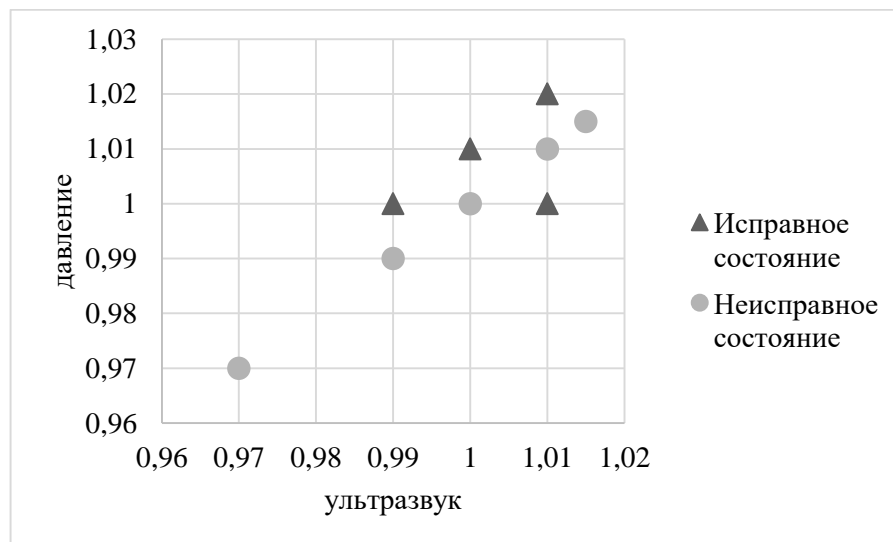
Таким образом, каждый параметр отклоняется от единицы в зависимости от выраженности дефекта, чувствительности к данному дефекту и погрешности. Данный подход имитирует ситуацию, когда величина дефекта сопоставима с влиянием погрешности, но при этом погрешность определяется случайными факторами, а влияние дефекта – систематическими. Такая ситуация наблюдается на ранних стадии развития дефектов.

Для реализации комплексной обработки данных по формулам (2.9) и (2.10) были сгенерированы параметры вибрации, температуры и давления четырехцилиндрового рядного дизеля. При наличии дефекта топливной аппаратуры наблюдается следующая тенденция: вблизи неисправного объекта вибрация, ультразвук растут, а температура и давление падают. В других точках измерения дефект наоборот вызывает снижение вибрации и ультразвука, рост температуры (чем ближе дефект, тем он сильнее сказывается на соседних точках). Эта тенденция отражена варьированием  $r_i$  в формуле 2.9. Параметр дефекта и параметр ошибок измерения при расчете задавались  $e=0,04$ .

Ниже представлены значения параметров, соответствующие исправному дизелю и дизелю с дефектом форсунки цилиндра №2.



а



б

Рисунок - 2.10 Параметры исправного и неисправного дизеля в естественных величинах: а – температура-вибрация; б – давление-ультразвук

Отклонение параметров неисправного цилиндра на 4% не может считаться признаком неисправности, и дефект не может быть выявлен на основании значений параметров вибрации, температуры, ультразвука, давления. Расстояние между центрами кластеров параметров в четырехмерном пространстве составляло пять единиц, и как показала практика этого недостаточно для постановки диагноза.

Необходима комплексная обработка данных различной физической природы по всем цилиндрам.

Для улучшения наглядности отображаемых результатов за счет корреляции между данными к параметрам дизелей была применена процедура ганкелизации диагностических параметров. Исходные ряды из 16 значений были преобразованы в матрицы размером 8 на 9 вида

$$v \begin{pmatrix} x_1^v & x_1^t & x_1^u & x_1^p & \dots & x_2^p \\ x_1^t & x_1^u & x_1^p & x_2^v & \dots & x_3^v \\ & & \vdots & & \ddots & \vdots \\ x_3^v & x_3^t & x_3^u & x_3^p & \dots & x_4^p \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

где  $x_i^v, x_i^t, x_i^u, x_i^p$  – параметры вибрации, температуры, ультразвука и давления  $i$ -го цилиндра.

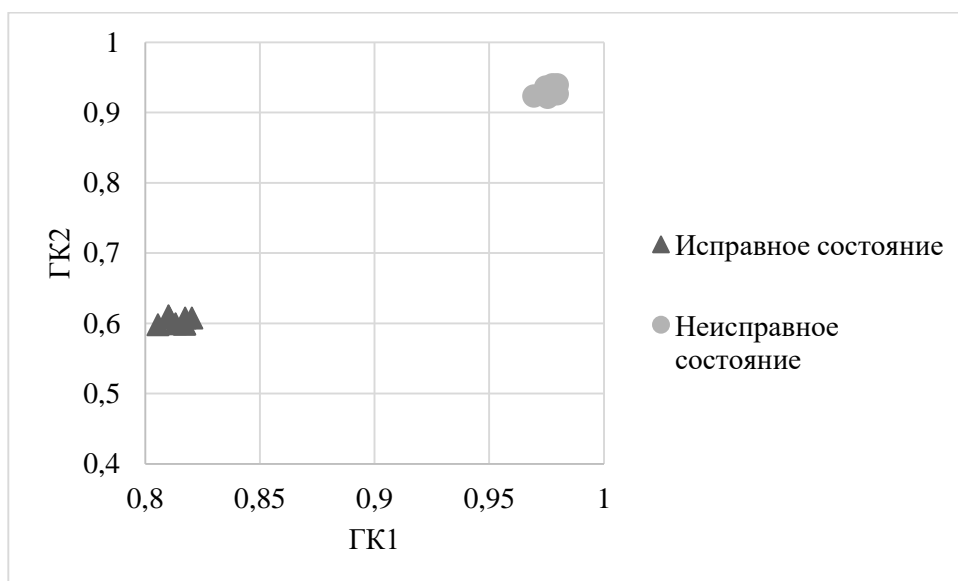


Рисунок 2.11 – Параметры исправного и неисправного дизеля в пространстве главных компонент

Матрица параметров исправного состояния была преобразована в ковариационную, которая в свою очередь подверглась сингулярному разложению с получением эталонного базиса. На эталонный базис были спроецированы как матрица исправных параметров, так и матрица неисправных (рисунок 2.11).

В результате проецирования в пространстве главных компонент получилось два несовпадающих кластера, положение которых описывает состояние оборудования. Расстояние между центрами проекций данных в пространстве ГК составляет 36 единиц.

Чтоб показать, как меняется наглядность отображаемых результатов за счет применения МГК при обработке данных, проводилось моделирование различных стадий развития дефекта, путем подстановки в формулу (2.9) возрастающих значений параметра  $e$ . При этом оценивалась разность между параметрами исправного и неисправного состояния в исходном базисе и расстояние между параметрами сравниваемых состояний в пространстве ГК. Порогом чувствительности назначалось расстояние 0,1.

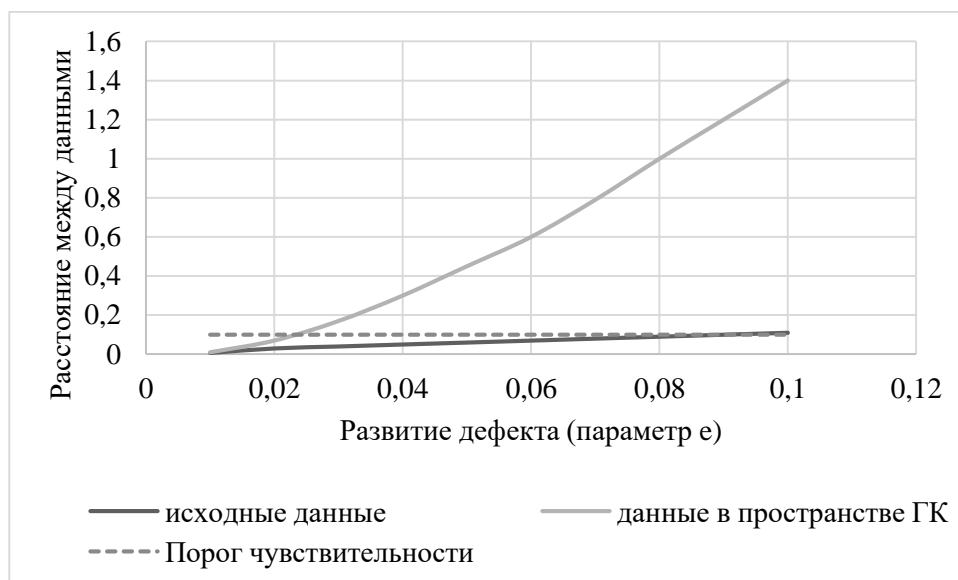


Рисунок 2.12 – Чувствительность представления данных в пространстве ГК при диагностировании дизелей

Таким образом, в вычислительных экспериментах были сгенерированы два набора данных, один из которых соответствовал тенденции изменений параметров при наличии дефекта, а второй случайному изменению параметров сопоставимому с влиянием дефекта. Расчетный эксперимент показал, что за счет предлагаемой обработки данных можно выявлять дефекты на существенно более ранних стадиях развития, несмотря на влияние случайных факторов.

Для апробации предлагаемой методики были обработаны диагностические данные дизелей одинаковой конструкции, один из которых является исправным, а в первом левом цилиндре другого развивался дефект (заклинивание поршня). Тип двигателя, - 12zv40/48, - двенадцатицилиндровый, четырехтактный, v-образный.

Производилось измерение вибрации вблизи цилиндров дизелей. Одновременно с измерением вибрации были зарегистрированы индикаторные давления в цилиндрах диагностируемых дизелей.

Известно [49], что при наличии дефекта СКЗ сигнала вибрации, измеренного вблизи неисправности может возрасти. Однако сопоставление СКЗ сигналов вибрации, измеренных вблизи первых левых цилиндров дизелей, один из которых неисправен, не позволяет выявить дефект. Функции плотности вероятности распределения параметров сигналов исправного и неисправного оборудования практически совпадают (Рисунок 2.13).

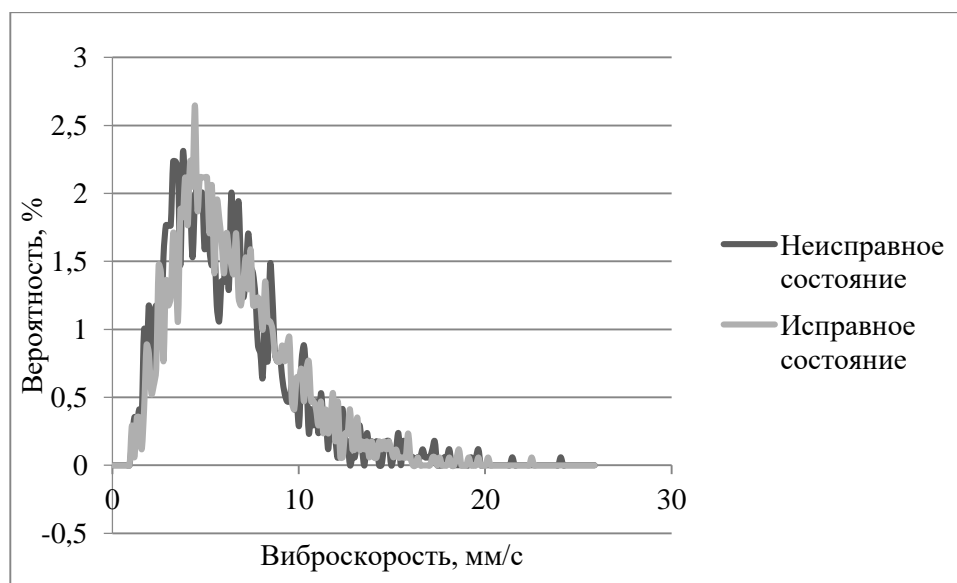


Рисунок 2.13 – Сопоставление СКЗ виброскоростей левого цилиндра №1 исправного дизеля и левого цилиндра №1 дизеля с развивающимся дефектом

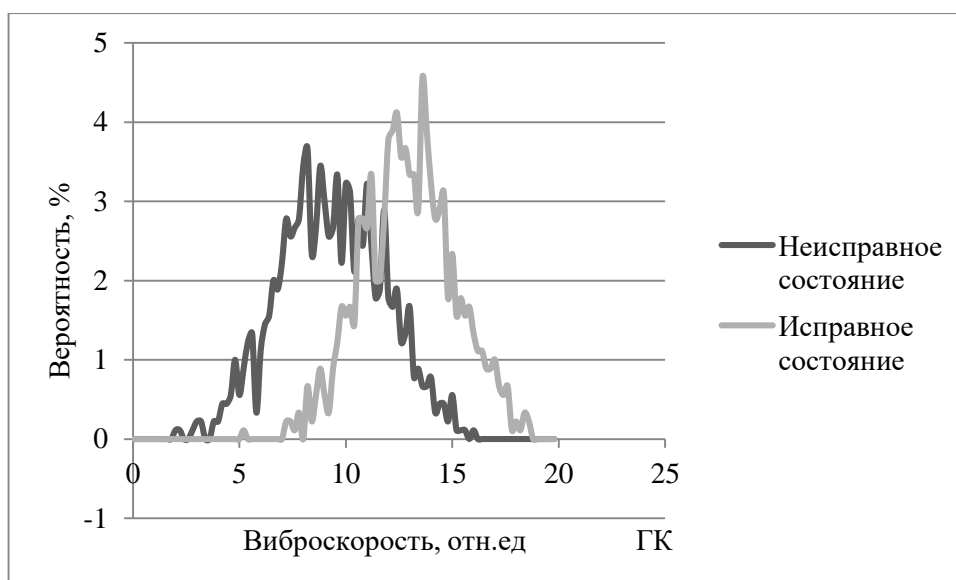


Рисунок 2.14 – Сопоставление проекций на первую компоненту сингулярного разложения СКЗ виброскоростей левого цилиндра №1 исправного дизеля и левого цилиндра №1 дизеля с развивающимся дефектом

С целью улучшения наглядности отображаемых результатов к параметрам дизелей был применен предлагаемый подход: параметры представлены в виде ганкелевой матрицы, преобразованы в матрицу ковариации, путем сингулярного разложения получен эталонный базис, на первую компоненту которого спроецированы параметры двух дизелей. Как видно по рисунку 2.14, применение предлагаемого подхода обеспечило улучшения наглядности отображаемых результатов.

Для дальнейшего повышения качества диагностирования целесообразно совместно с параметрами вибрации использовать информацию, содержащуюся в параметрах давления диагностируемых ДД.

На рисунке 2.15 представлены значения исходных (нормализованных) параметров состояния объектов: СКЗ сигналов вибраций и средних максимальных давлений сжатия по каждому цилиндру каждого дизеля. Поскольку в исходном пространстве наблюдается наложение кластеров исправного и неисправного состояний, то сделать вывод о состоянии объектов затруднительно.

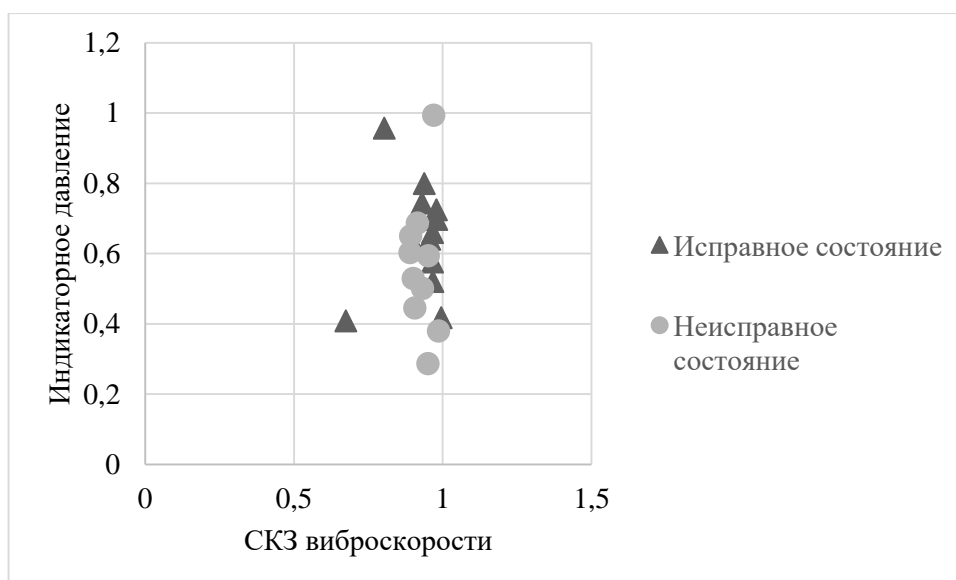


Рисунок 2.15 – Параметры исправного и неисправного дизеля в исходном пространстве

Для реализации МГК из параметров ДД различной природы были составлены две матрицы 12х13 вида:

$$\begin{pmatrix} x_{r1}^v & x_{r1}^p & x_{l1}^v & x_{l1}^p & \dots & x_{l3}^p \\ x_{r1}^p & x_{l1}^v & x_{l1}^p & x_{r2}^v & \dots & x_{r4}^v \\ & & \vdots & & \ddots & \vdots \\ x_{r5}^v & x_{r5}^p & x_{l5}^v & x_{l5}^p & \dots & x_{l6}^p \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

где  $x_{ri}^v$ ,  $x_{ri}^p$ ,  $x_{li}^v$ ,  $x_{li}^p$  – нормализованные параметры вибрации и давления  $i$ -х цилиндров слева и справа. В данной матрице давление неисправного цилиндра повторяется четыре раза, а вибрация – три. Дефект влияет на все параметры (пусть и в незначительной степени), и представление (2.12) обеспечивает выявление взаимной корреляции между ними, что в конечном итоге и позволяет более наглядно отображать диагностическую информацию.

В соответствии с предлагаемой схемой обработки данных матрица исправных параметров вида (2.12) была преобразована в матрицу ковариации, затем подверглась сингулярному разложению, в результате которого был



получен двумерный эталонный базис. Результаты проецирования параметров исправного и неисправного ДД на базис представлены на рисунке 2.16.

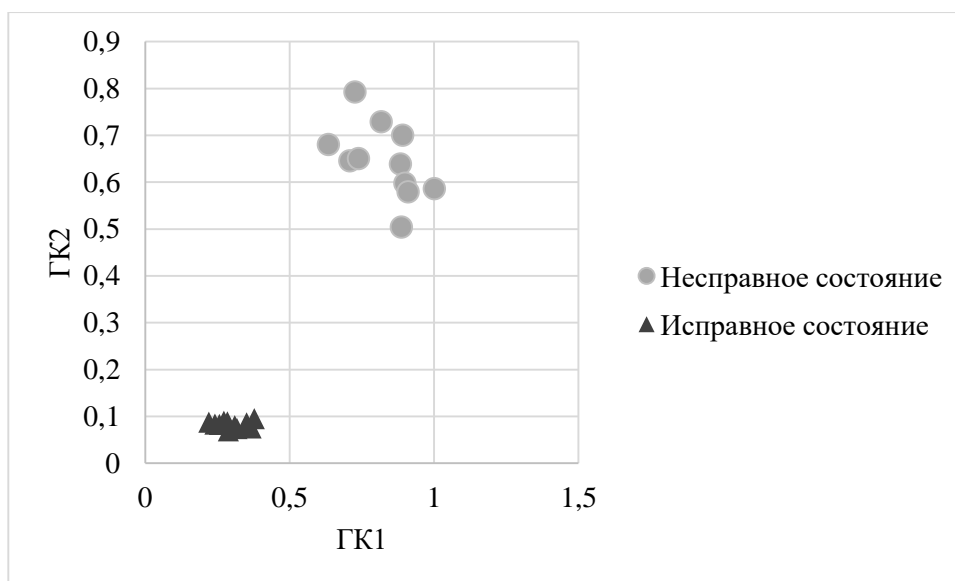


Рисунок 2.16 – Параметры исправного и неисправного дизеля в пространстве главных компонент

В пространстве ГК параметры исправного и неисправного оборудования формируют два несовпадающих кластера, что исключает неверное диагностирование. В исходных (физических) координатах расстояние между центрами кластеров исправного и неисправного состояний составило 0,11, а в пространстве ГК 0,77 отн. единиц.

Предлагаемый подход обеспечил сокращение объёмов информации, необходимой для диагностики, и наглядное представление результатов диагностирования. Не требуется хранение сорока восьми сигналов, которые были изначально зарегистрированы. Достаточно вычислить и сохранить СКЗ сигналов вибрации и средние максимальные давления сжатия.

## Выводы по главе 2

1 В соответствии с идеологией построения многоканальных информационно-измерительных диагностических систем проведен анализ особенностей сложных пространственно-распределенных объектов диагностирования и установлена необходимость расширения критериальных показателей с целью использования информационных аспектов выявляемости дефектов.

2 Для количественного отображения вклада измерительных каналов в пространство измерений разработана методика расчета информационных критериев идентифицируемости как меры отождествления дефекта и изолируемости характеризующей степень проявления генераций в измеряемых сигналах, вызванных дефектом.

3 Количественным анализом существующих методов локального диагностирования дизель-генераторного оборудования обоснована структура информационно-измерительной диагностической системы, содержащей четыре измерительных канала регистрирующих сигналы ультразвука, вибрации, температуры и давления.

4 Подготовка комплексного диагностического заключения в многоканальных ИИДС в значительной степени осложнено ограниченными возможностями оператора-диагноста традиционно использующего двухмерную область представления диагностических данных, что делает необходимым сокращение размерности измерительного пространства.

5 Информация в измерительных сигналах многоканальной информационно-измерительной системы представлена в виде временных рядов, что затрудняет проведение комплексного диагностического анализа. Для перехода в многомерное информационное пространство может быть применено математическое преобразование, позволяющее провести процедуру ганкелизации данных с их представлением в виде соответствующей матрицы.

6 Использование сингулярного разложения с проецированием данных на главные компоненты позволяет с наименьшими информационными потерями

провести кластеризацию данных, сократить размерность измерительного пространства и провести визуальный анализ.

7 Экспериментальными исследованиями установлена возможность повышения чувствительности диагностических параметров за счет их представления в пространстве главных компонент. Расстояние между центрами кластеров эталонного и анализируемого состояний диагностируемого оборудования при появлении дефекта увеличилось с 0,11 в физических до 0,77 в относительных единицах пространства главных компонент.

8 Экспериментально подтверждена возможность снижения вероятности ошибок ложного обнаружения и пропуска дефектов при использовании сингулярного разложения данных в пространстве главных компонент.

### 3 СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ИИДС

#### 3.1 Обоснование требований к техническим характеристикам измерительных средств

Использование методики построения многоканальной информационно-диагностической системы и экспериментальных данных представленных во второй главе обеспечило возможность разработки структуры системы для использования в диагностических процедурах контроля состояния установок резервного питания АЭС. Данная система способна проводить диагностику вибрационным, ультразвуковым методом, снимать термограммы и индикаторные диаграммы давления в цилиндрах с рабочего оборудования, а также имеется возможность наращивания числа измерительных каналов.

Разумно распределить измерения данных различной физической природы по разным каналам [39]. Таким образом, с учетом современных требований к диагностическому сопровождению эксплуатации ДГУ в состав системы входят четыре информационных канала: вибрации, ультразвуковой, термограмм, индикаторных диаграмм давления в цилиндрах.

Для предварительной обработки информации и выдачи первичных результатов диагностики по каждому каналу были проведены исследования, по результатам которых осуществлен:

- 1) расчет диагностических параметров (СКЗ, пик-фактор);
- 2) сравнение с нормативными значениями;
- 3) сравнение с результатами предыдущих измерений.

Далее производится анализ этих сигналов, включающий сравнение с параметрами в пределах типовых групп и сравнение с результатами предыдущих измерений. Информация в комплексном виде фиксируется в базе данных, может использоваться блоком обработки для формирования результатов диагностики.

В соответствии с разработанными алгоритмами обработки диагностической информации в блоке базы данных производится комплексный анализ данных и выдается заключение о комплексном состоянии

диагностируемого оборудования. Кроме того, в блоке базы данных хранятся сигналы, снятые с ранее контролируемого оборудования.

В целом, ИИДС пригодна для работы в помещении дизель-генераторной установки АЭС и соответствует следующим условиям эксплуатации:

- температура окружающего воздуха не ниже  $+5^{\circ}\text{C}$ ;
- влажность воздуха не выше 75%.

В соответствии с программами диагностирования ИИДС обеспечивает регистрацию данных, характеризующих состояние оборудования, включая:

- 1) виброакустические сигналы, характеризующие вибрационное состояние оборудования;
- 2) ультразвуковые сигналы для контроля состояния подшипников качения и скольжения, форсунок, цилиндрических втулок;
- 3) индикаторные диаграммы давления в цилиндрах;
- 4) термограммы различных зон оборудования.

Кроме этого в задачи ИИДС входят:

- расчет значений диагностических параметров в соответствии с используемой методикой диагностирования;
- определение технического состояния с использованием специализированных алгоритмов и баз данных (БД), содержащих нормативно-технические характеристики объекта диагностирования, историю эксплуатации, сведения о результатах предыдущих обследований и ремонтов.

В соответствии с требованиями к измерительным системам, используемым на АЭС структура ИИДС разработана по принципу объединения функционально законченных блоков, выполняющих свои функции в полном объеме и объединенных информационными потоками. ИИДС функционально включает в себя:

- первичные преобразователи (датчики) с узлами крепления;
- линии и устройства связи;
- программные средства, обеспечивающие обработку информации;
- переносной персональный компьютер с встроенной БД.

С учетом сценария проведения планово-предупредительных ремонтов на АЭС ИИДС реализует следующие функции:

- ввод с измерительной аппаратуры и сохранение в БД диагностических сигналов и иной информации о техническом состоянии дизель-генераторного оборудования;
- обработку полученных данных в соответствии с принятыми методиками и сохранение результатов;
- поиск и вывод нужных сведений из БД, включая таблицы, документы и диагностические сигналы;
- формирование отчетных документов по принятой форме;
- вспомогательные функции по поддержанию информационной безопасности и целостности данных.

При необходимости в ИИДС предусматривается возможность увеличение числа модулей и блоков, входящих в его состав, а также расширения его функций в рамках программно-технических средств.

Регистрация ультразвуковых сигналов обеспечивается в диапазоне частот от 20 до 100 кГц.

Тепловизор обладает следующими характеристиками:

- оптическое поле зрения — стандартное, дополнительно желательно наличие телеобъектива;
- наличие функции совмещения инфракрасного и реального изображений;
- диапазон измерения температур от 0 до плюс 500 °С;
- погрешность измерения не должна превышать  $\pm 2\%$  (но не более  $\pm 2^\circ\text{C}$ );
- разрешающая способность по температуре не более 0,1 °С;
- спектральный диапазон — длинноволновый (от 8 до 14 мкм);
- разрешение инфракрасного изображения 640x480 пикселей;
- доступ к данным — через разъем USB или через SD-карту.

Прибор для измерения давления в цилиндрах и снятия индикаторных диаграмм имеет следующие параметры:

- диапазон измеряемых давлений от 1 до 25 МПа;
- погрешность измерения давления (ГОСТ 53639-2009) не более 3% [71].

ИИДС допускает возможность отдельной эксплуатации модулей и блоков, входящих в его состав, а также его расширения функций в рамках возможности программно-технических средств.

Для работы с базой данных и обработки полученных результатов необходимо использовать переносной персональный компьютер. Производительность процессора, объем оперативной памяти и внутреннего накопителя достаточны для выполнения функций ИИДС.

Работа в условиях АЭС требует использование оборудования преимущественно защищенного исполнения. Соответственно есть смысл выбрать ноутбук защищенного промышленного исполнения, например, Desten CyberBook S395.

Для обеспечения качественного съема вибрационных сигналов есть смысл взять беспроводные вибродатчики. Можно использовать трехкоординатные датчики типа VS-3D. Передача информации от этих датчиков в персональном компьютере (ПК) осуществляется через беспроводную сеть Wi-Fi (IEEE 802.11, 2,4 ГГц). Передача реализована на базе протокола UDP. При одновременном использовании нескольких датчиков возможна синхронная регистрация с точностью не хуже  $\pm 1$  мс. Настройка датчика осуществляется через USB-интерфейс.

Для обеспечения работы ультразвукового канала системы подходит ультразвуковой течеискатель «SDT-270» [44]. Данный прибор имеет возможность подключения к ПК через USB-интерфейс.

Для снятия термограмм можно использовать тепловизор Testo 890-2. Данный прибор имеет возможность подключения к ПК через USB интерфейс или через SD-карту.

Для дизелей, на цилиндрах которых установлены индикаторные краны есть возможность снятия индикаторных диаграмм. Для этого можно использовать прибор для динамического измерения давления в двигателях внутреннего сгорания ELPI-25. Данный прибор состоит из мини-компьютера и датчика давления. Связь между мини-компьютером и датчиком осуществляется по радиоканалу. Передача результатов измерений на ПК ИИДС осуществляется через USB интерфейс.

Структура технических средств разработана по принципу объединения функционально законченных блоков, выполняющих свои функции в полном объеме и объединенных информационными потоками. ИИДС допускает возможность отдельной эксплуатации модулей и блоков, входящих в его состав. Структурная схема комплекса технических средств ИИДС представлена на рисунке 3.1.

Штатный режим функционирования комплекса включает в себя следующие режимы работы:

- виброконтроль (анализ сигналов вибрации);
- контроль ультразвуковых параметров (УЗП);
- тепловизионный контроль (анализ термограмм);
- контроль изменения давления в рабочем цилиндре за период протекания всех процессов смесеобразования и сгорания (анализ давления);
- работа с БД;
- протоколирование;
- конфигурирование.



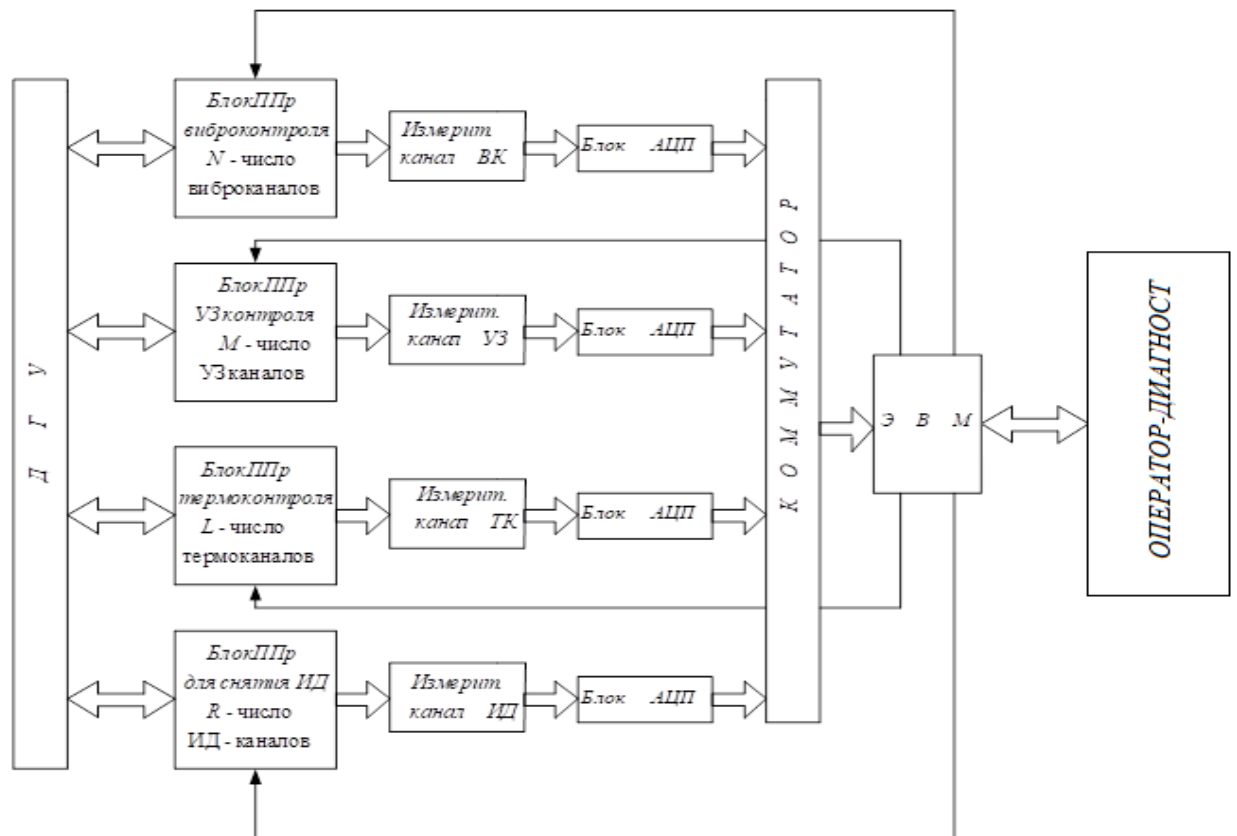


Рисунок 3.1 – Структурная схема ИИДС

В итоге в состав ИИДС входят переносной защищенный ПК и периферийные средства, указанные в таблице 3.1.

ИИДС может быть выполнена в виде мобильного переносного оборудования и не требует специального размещения на объектах. Для перемещения составных частей ИИДС используются кейсы с возможностью их расположения на входящей в комплект тележке-стеллаже.

Таблица 3.1 – Периферийные устройства ИИДС

Наименование	Количество
Датчик трехкоординатный VS-3D	12
Прибор для динамического измерения давления в двигателях внутреннего сгорания ELPI-25	1
Тепловизор Testo 890-2	1
Ультразвуковой течеискатель «SDT-270»	1

Временное рабочее место оператора ИИДС, на котором осуществляются непосредственные работы по получению измерительных данных, оснащено минимально необходимым для проведения измерений количеством соответствующих модулей ИИДС и имеет возможность установки тележки-стеллажа.

Анализ результатов измерений производится с помощью специализированного ПО, установленного на входящем в состав комплекса переносном ПК.

### 3.2 Анализ результатов экспериментальных исследований диагностических сигналов

Как уже было сказано ранее в данной ИИДС в качестве измерительных каналов используются отдельные приборы, объединяемые единой базой данных, реализуемой специализированным программным обеспечением, установленным на переносном ПК.

Для обеспечения надежной и стабильной работы предлагается использовать ПК защищенного промышленного исполнения. Для выполнения данных условий был подобран ноутбук Desten CyberBook S395, основные технические характеристики которого представлены в приложении Е в таблице Е.1.

Для реализации работы канала измерения температуры основных узлов ДГУ в ИИДС предлагается использовать тепловизор. В рамках реализации данного проекта по основным характеристикам был подобран Тепловизор Testo 890-2. Данное устройство способно производить бесконтактные измерения пространственного распределения температуры поверхностей объектов по их тепловому излучению.

Принцип действия тепловизора основан на фиксации инфракрасного (теплого) электромагнитного излучения объекта, фокусировке излучения с помощью оптической системы на приёмнике, представляющем собой неохлаждаемую микроболометрическую матрицу, регистрации и математической обработки полученного сигнала посредством электронного

блока измерения и отображения распределения температуры на экране ЖК-дисплея.

Интенсивность и спектр инфракрасного (теплового) электромагнитного излучения зависят от свойств тела и его температуры. Так возникает спектральная картина (термограмма), отображающая распределение температуры на поверхности объекта или на границе разделения различных сред, на основе преобразования интенсивности инфракрасного электромагнитного излучения в электрический сигнал. Измерение температуры осуществляется в центре теплового изображения объекта. Значение температуры отображается в цифровой форме. При этом размеры отображаемой поверхности объекта определяются угловым полем зрения тепловизора.

Метрологические характеристики тепловизора Testo 890-2 приведены в приложении Е таблице Е.2. Основные технические характеристики тепловизора Testo 890-2 приведены в приложении Е, таблице Е.3.

В основу реализации канала измерения ультразвуковых параметров при диагностике ДГУ, предлагается использовать портативный детектор ультразвуковых волн (течеискатель) SDT 270. Данный прибор обладает многочисленными функциями, которые обеспечивают простой, быстрый и точный неразрушающий контроль различного оборудования. Имеет прочный алюминиевый корпус с резиновым покрытием, который обеспечивает выносливость данного аппарата даже в тяжелых условиях работы. Применяется при поиске утечек газов, сжатого воздуха в труднодоступных местах, негерметичности резервуаров, трубопроводов, газопроводов, вентилей и клапанов.

Портативный течеискатель SDT-270 имеет следующие особенности:

- детектирование широкополосного ультразвукового сигнала (полоса пропускания 100 кГц);
- осуществление сбора данных с частотой дискретизации 250 кГц;
- возможность выбирать время записи сигнала;
- автоматическое распознавание датчиков;

- наличие двух независимых входов для датчиков;
- наличие встроенного бесконтактного тахометра и пирометра;
- встроенная база данных;
- наличие базы данных SQL;
- возможность переключения между операторами;
- возможность сравнения результатов, полученных с разных датчиков;
- встроенная система предупреждения (сигнализаций);
- дистанционное управление.

Технические характеристики течеискателя SDT-270 приведены в приложении Е, таблице Е.4.

Для реализации измерения показателя вибрации отдельных элементов и узлов ДГУ предлагается использовать специализированные беспроводные трехкоординатные датчики вибрации типа «VS-3D». Данные датчики предназначены для измерения СКЗ виброскорости и амплитудного значения виброускорения в трех взаимно ортогональных плоскостях.

Принцип действия датчиков основан на преобразовании вибрации контролируемого объекта в электрический сигнал, пропорциональный виброускорению, и дальнейшей его обработке.

Датчики представляют собой виброизмерительный канал, состоящий из трех чувствительных элементов, основанных на использовании технологии микроэлектромеханических систем, и расположенных в трех взаимно ортогональных плоскостях, микроконтроллера, осуществляющего обработку поступающих сигналов по трем осям (в частности, одинарное интегрирование), и передатчика с встроенной антенной. Для визуализации результатов измерений полученные данные передаются при помощи антенны на принимающее устройство (компьютер или телефон), в нашем случае возможна передача сигнала непосредственно на ноутбук Desten CyberBook S395.

Начало работы беспроводного датчика VS-3D задается общим запускающим импульсом от прибора. По окончании регистрации информация от

датчиков-логгеров по радиоканалу передается в прибор, где просматривается и анализируется.

Основные метрологические и технические характеристики беспроводного датчика VS-3D приведены в приложении Е, таблице Е.5.

Также при наличии технической возможности проведения измерений давления в цилиндрах ДГУ предлагается использовать прибор для динамического измерения давления в двигателях внутреннего сгорания ELPI-25, который предназначен для контроля за мгновенным значением давления в цилиндрах крупногабаритных дизельных силовых установок и позволяет отслеживать момент воспламенения индивидуально для каждого цилиндра, а также проводить сравнительный анализ моментов воспламенения в различных цилиндрах и синхронности их работы.

Технические характеристики прибора ELPI-25 приведены в приложении Е, таблице Е.6.

Все вышеперечисленные средства, входящие в состав разрабатываемой ИИДС для проведения измерений, применяются на АЭС как самостоятельные приборы. Поэтому можно сказать, что инструментальные погрешности ИИДС соответствуют погрешностям используемых технических средств, которые периодически подвергаются метрологической аттестации службами атомной станции в соответствии с рекомендациями методов определения метрологических характеристик средств измерений, применяемых в области использования атомной энергии (МИ 3592-2017). В соответствии с данным требованием к работе допускаются приборы, которые имеют погрешность измерений диагностических сигналов, не превышающую 5%.

В процессе разработки ИИДС измерительные каналы были испытаны при диагностике ДГУ Волгодонской ТЭЦ-2. 15 мая 2018 года на данной установке, имеющей в составе дизель рядный, четырехтактный, шестицилиндровый, мощностью 50 кВт марки ДГМА-48М1 были проведены измерения ультразвуковых параметров и измерения температуры. Работы выполнялись совместно с Е.А. Абидовой.

Измерения ультразвуковых параметров проводились в 12 различных точках, обозначенных в таблице 3.2. для измерения и регистрации ультразвуковых сигналов использован прибор SDT-270.

Таблица 3.2 – Точки контроля ультразвуковых параметров ДГМА-48М1

№ п/п	Наименование	СКЗ, дБмкВ
1	Водяной насос (подшипник)	45,4
2	Масляный насос (подшипник)	63,7
3	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №1	73,1
4	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №2	71,4
5	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №3	70,3
6	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №4	74,3
7	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №5	71,7
8	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №6	75,4
9	Корпус подшипника генератора №1	18,7
10	Корпус подшипника генератора №2	9,2
11	Корпус генератора левая сторона	32,4
12	Корпус генератора правая сторона	24,1

Различия ультразвуковых сигналов на трубках высокого давления составляет менее 7%, что говорит о равномерности работы агрегата.

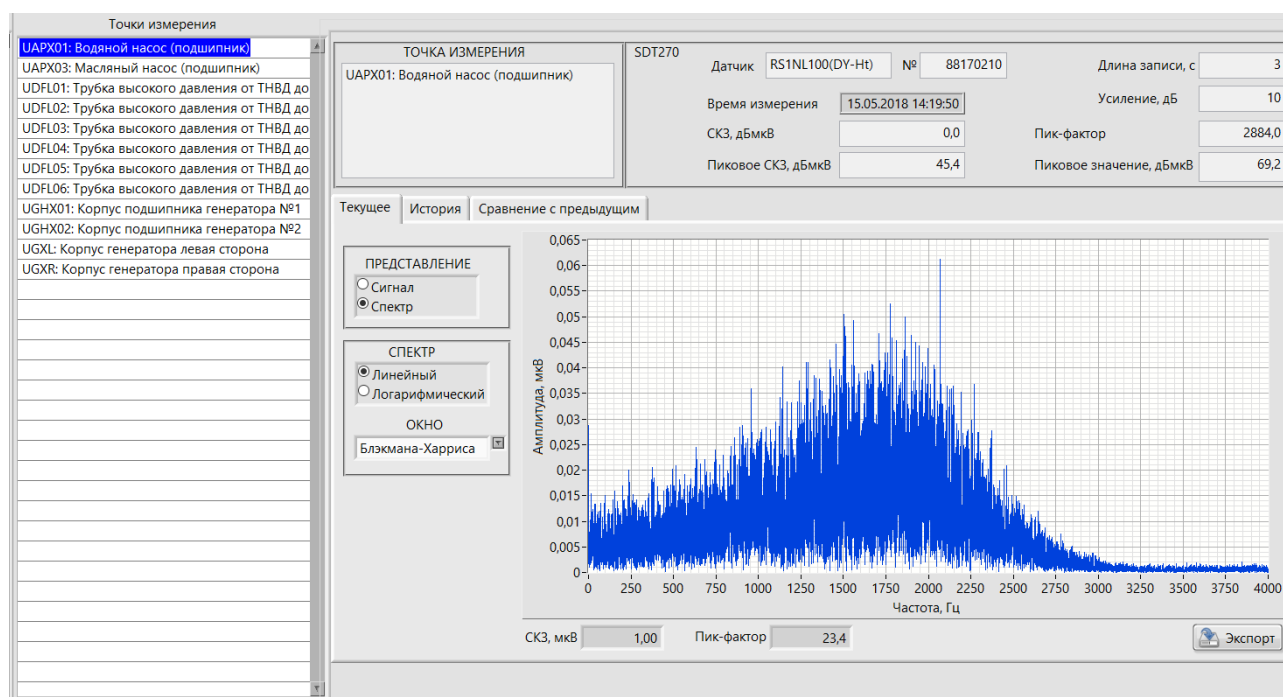


Рисунок 3.2 – Спектр ультразвукового сигнала с подшипника водяного насоса ДГМА-48М1

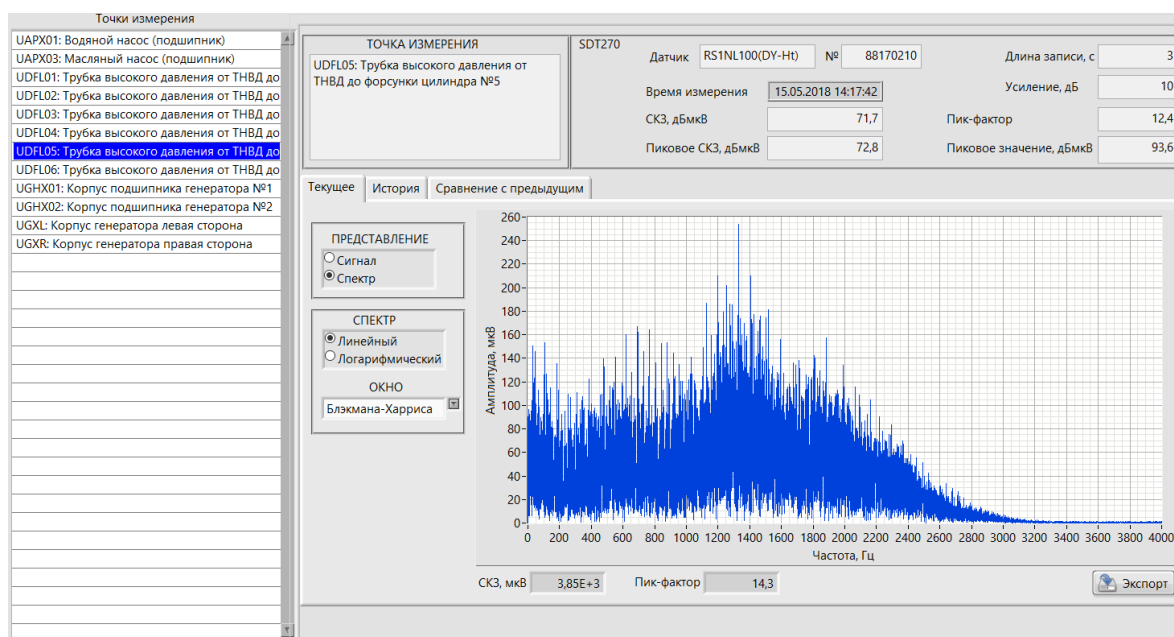


Рисунок 3.3 – Спектр ультразвукового сигнала с трубки ТНВД №5 ДГМА-48М1

По результатам анализа огибающей огибающая сигнала на трубке от ТНВД №5 (рисунок 3.4) отличается от огибающих сигналов данной группы объектов (рисунок 3.5) менее выраженной повторяемостью на периоде топливного цикла. Что может классифицироваться как наличие незначительного дефекта.

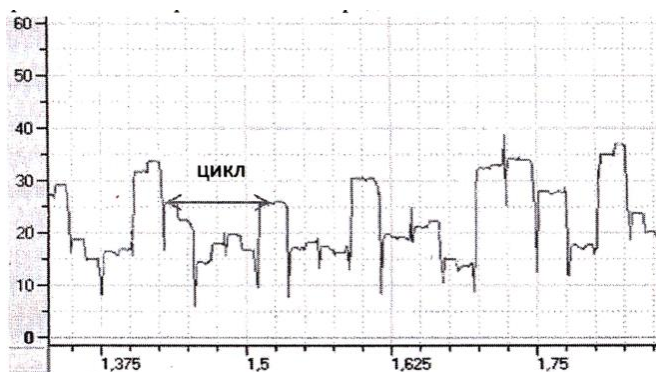


Рисунок 3.4 – Огибающая сигнала на трубке от ТНВД № 5

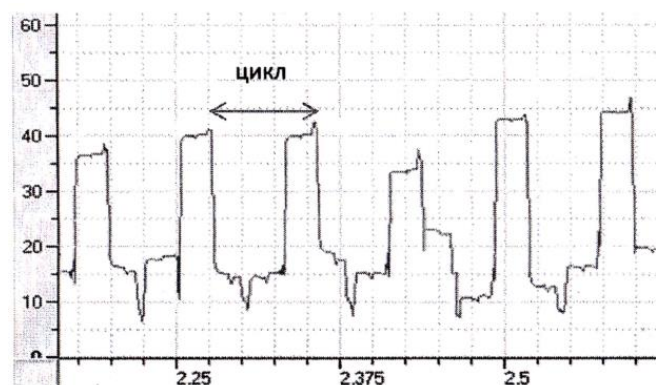


Рисунок 3.5 – Огибающая сигнала на трубке от ТНВД № 1

Измерения температуры проводилось в 16 различных точках, обозначенных в таблице 3.3, для измерения и регистрации температурных параметров использован тепловизор Testo 890-2.

Таблица 3.3 – Точки контроля температуры ДГМА-48М1

№ п/п	Наименование	Измер. температура, °C
1	Выход масла	62,7
2	Выход охлаждающей жидкости	63,8
3	Вход охлаждающей жидкости	62,2
4	Вход масла	62,2
5	Выхлопной патрубок цилиндра №3	132,8
6	Выхлопной патрубок цилиндра №4	132,8
7	Выхлопной патрубок цилиндра №5	146,6
8	Выхлопной патрубок цилиндра №6	146,1
9	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №1	29
10	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №2	30
11	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №3	28
12	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №4	30
13	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №5	28
14	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №6	29
15	Подшипник генератора №2	18
16	Корпус генератора (правая сторона)	18

Диагностические параметры контроля температуры основных узлов ДГУ можно представить визуально.

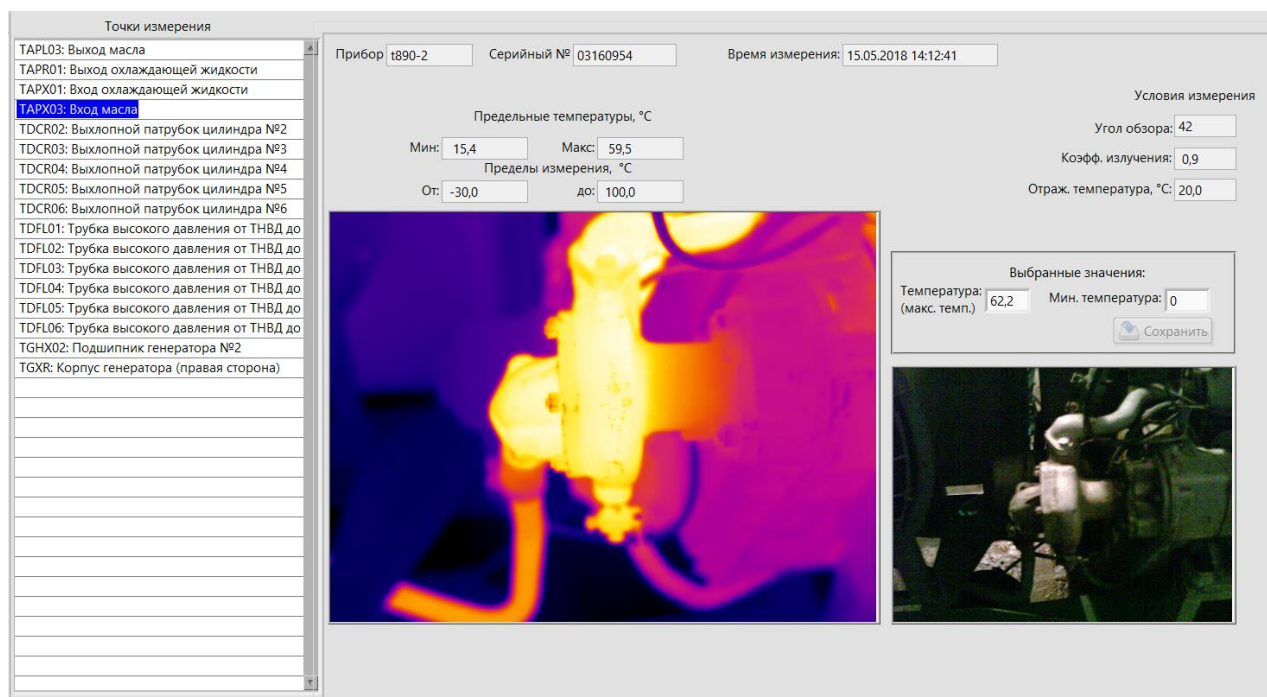


Рисунок 3.6 – Термограмма маслонасоса ДГМА-48М1



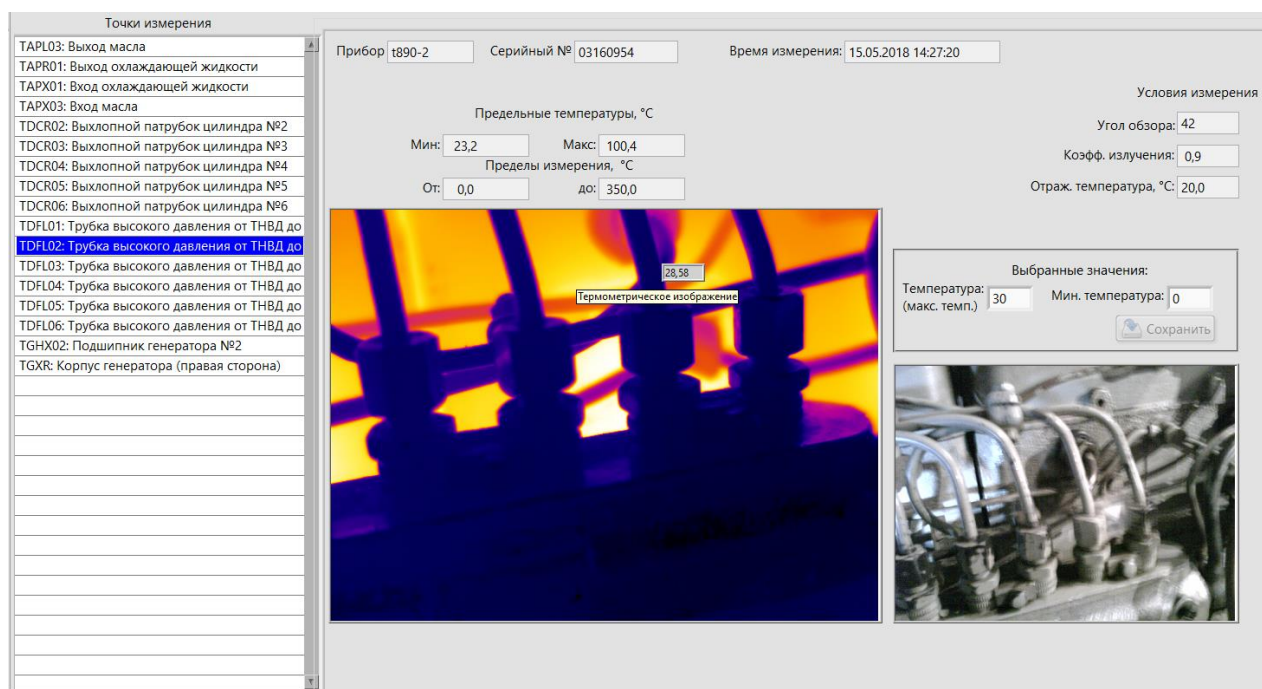


Рисунок 3.7 – Термограмма трубок ТНВД ДГМА-48М1

По результатам обследования термограмм дизель-генераторной установки ДГМА-48М1 особых отклонений выявлено не было. Все параметры находились в допустимых пределах.

Результаты данных исследований показали возможность использования данной группы приборов во многоканальных ИИДС при мониторинге состояния дизель-генераторного оборудования.

Далее 27.09.2018 было проведено второе обследование совместно с Е.А. Абидовой данной ДГУ. В процессе обследования проводились измерения по трем каналам: измерение вибрации, измерение ультразвуковых параметров, измерение температуры.

Измерение вибрации проводилось в 20 точках. Использовались датчики VS-3D. Точки измерения вибрации сведены в таблицу 3.4

Данные полученные в результате измерений вибрации могут быть представлены в графическом виде (рисунок 3.8).

Таблица 3.4 – Точки измерения вибрации ДГМА-48М1

№ п/п	Наименование	СКЗ s, мкм	СКЗ V, мм/с	СКЗ a, м/с <sup>2</sup>	Примечания
1	Левый борт остова со свободного конца в районе головок цилиндров	65,2	11	31	превышение нормы
2	Левый борт остова посередине в районе головок цилиндров	75,9	8,9	29	превышение нормы
3	Левый борт остова со стороны генератора в районе головок цилиндров	47,2	8,8	39	превышение нормы
4	Левый борт остова со свободного конца в районе опор для крепления	55,9	8,3	36	превышение нормы
5	Левый борт остова посередине в районе опор для крепления	99,9	15	42	превышение нормы
6	Левый борт остова со стороны генератора в районе опор для крепления	78,6	11	26	
7	Правый борт со свободного конца в районе головок цилиндров	72,3	9,9	43	превышение нормы
8	Правый борт посередине в районе головок цилиндров	48,8	6,8	38	превышение нормы
9	Правый борт со стороны генератора в районе головок цилиндров	92,8	13	40	превышение нормы
10	Правый борт со свободного конца в районе опор для крепления	66,3	13	40	превышение нормы
11	Правый борт посередине в районе опор для крепления	109	14	38	превышение нормы
12	Правый борт со стороны генератора в районе опор для крепления	132	12	25	
13	Подшипник генератора №1 слева	42,6	8,2	8,9	
14	Подшипник генератора №2 слева	71,4	11	8	
15	Подшипник генератора №1 справа	55,1	8,9	7,7	
16	Подшипник генератора №2 справа	70,7	11	10	
17	Левая сторона фундаментной балки генератора со стороны дизеля	34,9	6,3	19	превышение нормы
18	Левая сторона фундаментной балки генератора со стороны свободного конца	34,6	5,7	12	
19	Правая сторона фундаментной балки генератора со стороны дизеля	26,2	5,6	10	
20	Правая сторона фундаментной балки генератора со стороны свободного конца	33,4	6,6	19	превышение нормы

На данном графике желтым цветом выделены предельные значения вибраций в этих точках в соответствии с ГОСТ 31349-2007. Видно, что вибрационные параметры в некоторых точках превышают допустимые [70]. Это показывает, что данная ДГУ нуждается в профилактическом ремонте.

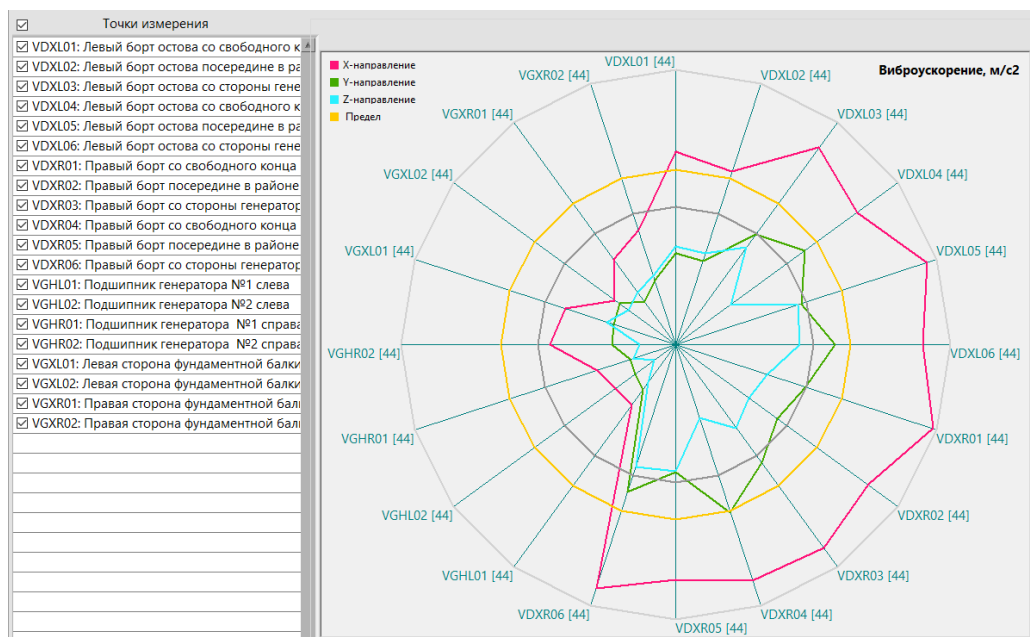


Рисунок 3.8 – Сопоставление нескольких вибрационных сигналов различных точек при диагностике ДГМА-48М1

Также были проведены измерения ультразвуковых параметров и контроль температуры. Так как диагностика данными параметрами проводилась ранее – есть возможность сопоставить данные с предыдущими. Для этого возможно использование метода главных компонент.

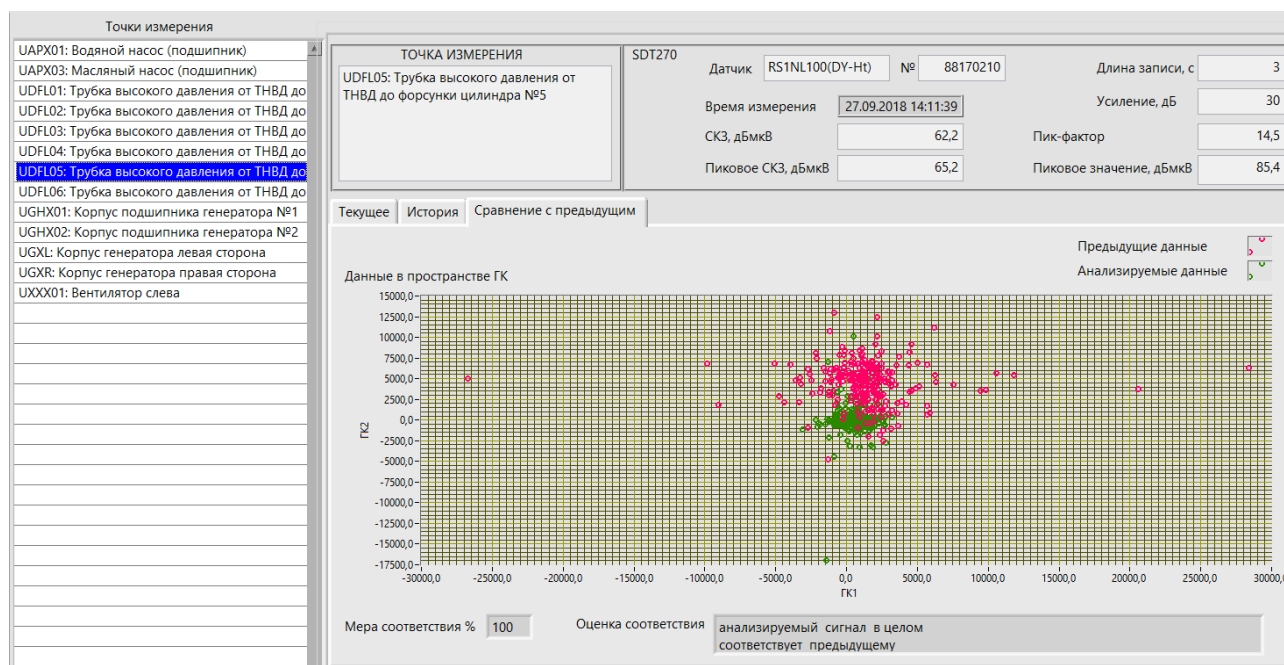


Рисунок 3.9 – Изменение распределения значений ультразвукового сигнала от трубки ТНВД №5 ДГМА-48М1 за период с 15.05.2018 по 27.09.2018

На данном графике видно, что в целом исследуемый сигнал соответствует предыдущим показаниям. При дальнейшем диагностировании данной ДГУ возможно наблюдать изменение данных параметров, в случае их возникновения.

Результаты исследований по диагностике ДГУ Волгоградской ТЭЦ-2 показали, что использование многоканальной ИИДС дает возможность обнаружения дефектов на более ранних стадиях развития, по сравнению с локальными штатными системами контроля. Возможность применения данной системы диагностики подтверждается актом внедрения метода диагностирования механизмов циклического действия (Приложение А).

## Выводы по главе 3

1 Условия эксплуатации и специфика конструкции дизель-генераторных установок АЭС определяют технические требования к составу и алгоритмам функционирования информационно-измерительных диагностических систем. Учитывая, что процессы зарождения и развития дефектов взаимосвязаны с величинами давлений в цилиндрах поршневой группы, температурами характерных поверхностей и вибрациями в определенных частотных диапазонах, установлено необходимое количество измерительных каналов, обеспечивающих проведение штатных диагностических процедур.

2 Применительно к диагностике дизель-генераторных установок исследованы и доведены до инженерных решений характеристики четырех измерительных каналов, обеспечивающих измерение, регистрацию и обработку вибрационных, ультразвуковых сигналов, а также индикацию давления и термографических изображений.

3 Выполнение метрологических требований и рекомендаций МИ 3592-2017 применительно к измерительным приборам используемых в каналах ИИДС обеспечивает возможность диагностического сопровождения технического обслуживания оборудования АЭС.

4 Разработанные теоретические положения по созданию диагностических систем оценки технического состояния оборудования подтверждены результатами экспериментальных исследований. Используемые измерительные средства обеспечивают возможность проведение диагностических процедур по штатным и комплексным методикам.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ИИДС ДИАГНОСТИКИ ДГУ РЕЗЕРВНОГО ПИТАНИЯ В ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

##### 4.1 Программно-техническая реализация диагностического комплекса. ER-модель базы данных ИИДС

Нормативным документом ГОСТ Р ИСО 17359 установлены требования к методам и средствам прогнозирования и развития неисправностей оборудования АЭС [72]. В его основу заложены условия, способствующие повышению доверия к результатам диагностирования. Следует отметить, что специфика объектов диагностирования в условиях АЭС и условия их использования являются основными факторами, которые определяют содержание основных требований к средствам диагностирования [51].

С учетом сформулированных выше требований информационно-диагностического сопровождения эксплуатации ДГУ и для реализации требуемых функций в состав ИИДС входят следующие основные блоки (Рисунок 4.1):

- блок регистрации, включающий модули виброконтроля, контроля ультразвуковых параметров, тепловизионного контроля и контроля индикаторных диаграмм давления в цилиндрах;
- блок обработки, включающий модули анализа вибрации, анализа ультразвуковых сигналов, анализа термограмм, анализа индикаторных диаграмм давления в цилиндрах;
- база данных.

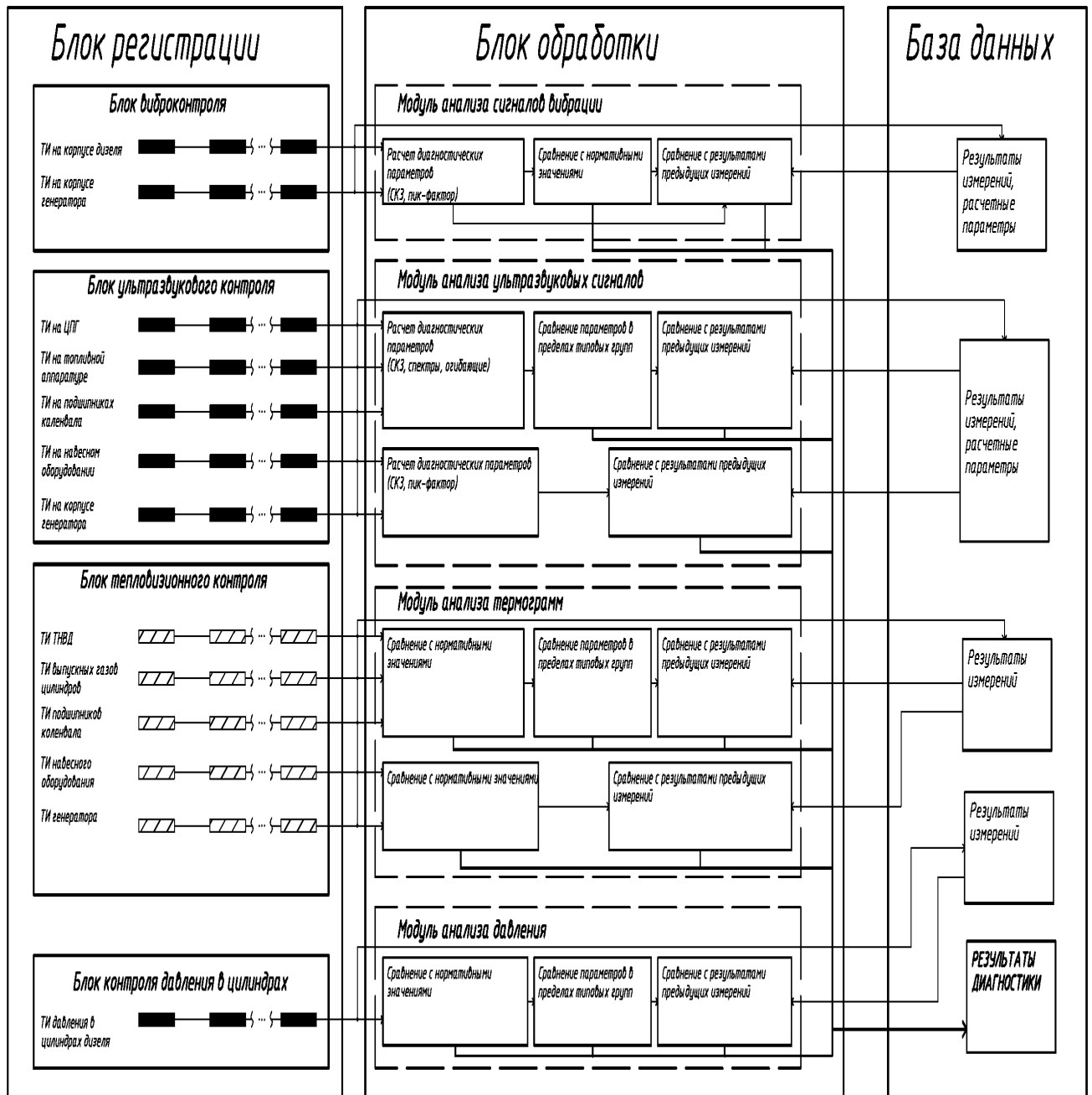


Рисунок 4.1 – Блок-схема ИИДС

Таким образом, с учетом вышесказанного, а также опыта при проведении планово-предупредительных ремонтов на АЭС были сформулированы технические требования к опытно-промышленному варианту ИИДС:

1) ИИДС регистрирует сигналы вибрации, ультразвука, температурные поля в различных точках дизель-генератора, а также регистрирует индикаторные диаграммы давления в цилиндрах.

2) Регистрация вибрации производится в наиболее информативных зонах, объединенных в типовые группы. Число каналов регистрации вибрации

достаточно для обеспечения одновременной записи сигналов вибрации в типовые группы.

3) Выполняется контроль температур выхлопных газов по цилиндрам, охлаждающей воды и масла на входе и выходе из дизеля.

4) Все составные части ИИДС имеют автономные источники питания, емкость которых достаточна для проведения необходимых измерений.

5) В ИИДС предусмотрены функции для защиты от потерь данных при сбоях аппаратуры, программного обеспечения и ошибках оператора.

6) Взаимодействие оператора с программным обеспечением ИИДС понятно и удобно. Средства редактирования информации удовлетворяют принятым соглашениям по использованию элементов интерфейса пользователя. Интерфейс соответствует современным эргономическим требованиям.

7) Программное обеспечение должно иметь дружелюбную реакцию на неверные действия оператора, неверный формат или недопустимые значения входных данных.

Как было отмечено ранее в состав каналов ИИДС рекомендованы следующие устройства: переносной ПК (ноутбук Desten CyberBook S395) защищенного промышленного исполнения, датчики вибрации в беспроводном исполнении VS-3D, тепловизор Testo 890-2, портативный детектор ультразвуковых волн (течеискатель) SDT 270, прибор для динамического измерения давления в двигателях внутреннего сгорания ELPI-25. Все эти приборы используются на АЭС как локальные средства контроля. Общий вид ИИДС диагностирования дизель-генераторных установок представлен на рисунке 4.2.

Для реализации комплексной работы устройств и создания единой базы данных диагностических параметров было разработано специальное программное обеспечение [52].

Прикладная программа для ЭВМ «Диагностика дизеля» предназначена для работы в составе системы, настройки и управления аппаратной частью ИИДС, для регистрации, обработки и хранения регистрируемых данных, а также сбора



данных с беспроводных датчиков вибрации ИИДС. ПО разработано с использованием рекомендаций по стандартизации [17].

Для связи с беспроводными трехкомпонентными датчиками вибрации используется встроенный модуль Wi-Fi ноутбука, данные с остальных приборов вносятся с помощью встроенного интерфейса USB ноутбука.



Рисунок 4.2 – Общий вид ИИДС диагностирования дизель-генераторных установок

Концептуальная ER-модель базы данных ИИДС приведена на рисунке 4.3. Общая модель базы данных ИИДС состоит из следующих взаимосвязанных подмоделей:

- подмодель «Дизель-генератор»;
- подмодель «Типовые группы»;
- подмодель «Измеренные данные»;
- подмодель «Обработка данных»;
- подмодель «Нормативные параметры»;
- подмодель «Выходные документы».

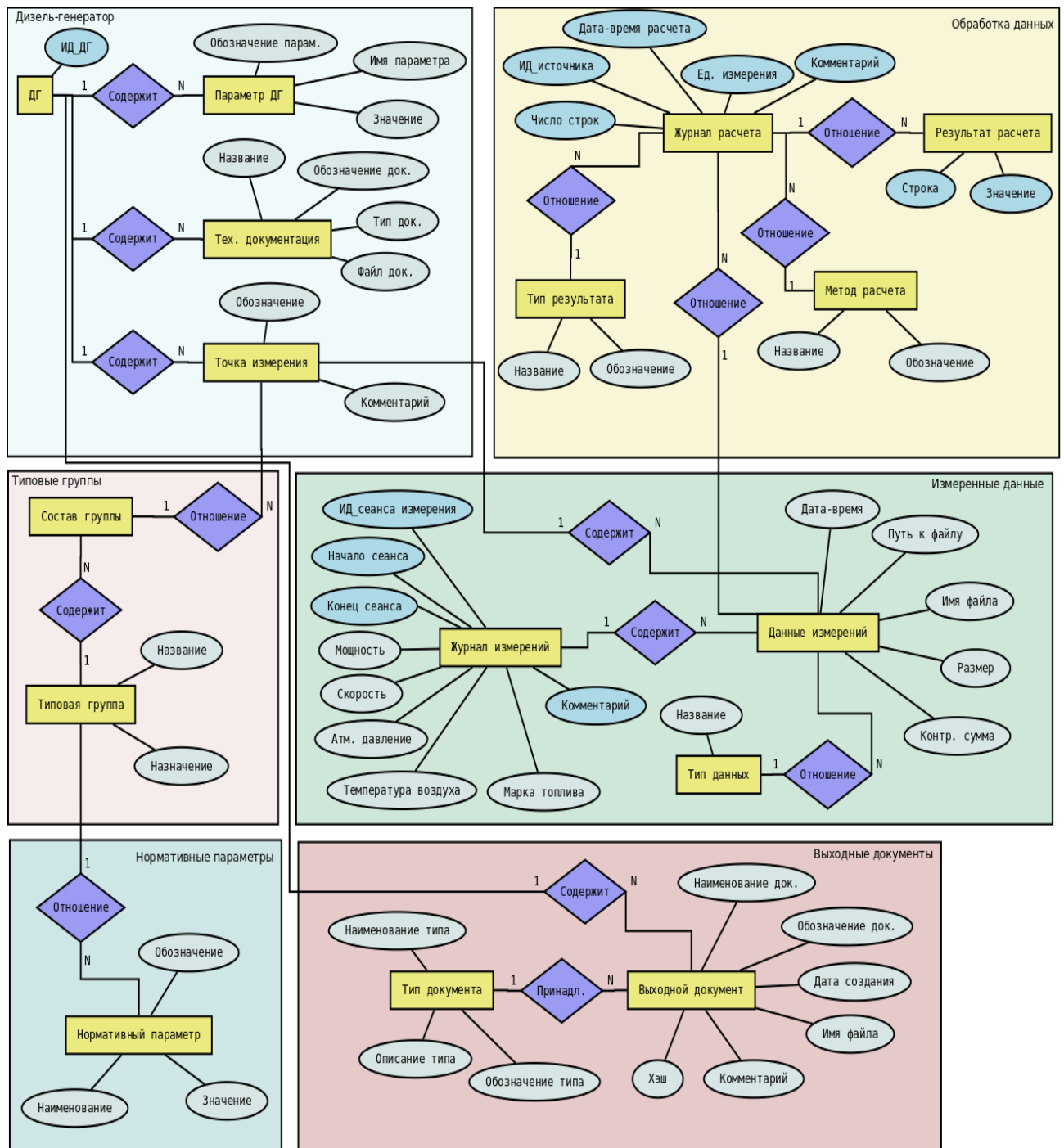


Рисунок 4.3 – ER-модель базы данных ИИДС

Подмодель данных «Дизель-генератор» содержит информацию об объекте диагностирования. Подмодель состоит из следующих сущностей:

- «ДГ» – сущность, содержащая идентификатор дизель-генератора, служит для связывания информации о дизель-генераторе, хранящейся в других сущностях подмодели;
- «Параметр ДГ» – сущность, содержащая технические данные дизель-генератора, его тип, мощность и т.п.;

- «Тех. документация» – сущность, содержащая эксплуатационную документацию дизель-генератора;

«Точка измерения» – сущность, содержащая список мест измерения, сведения об их обозначении, расположении на дизеле и генераторе, и состоит из следующих сущностей:

- «Типовая группа» – сущность, содержащая название и назначение группы;
- «Состав группы» – сущность для связи названия группы со списком идентификаторов точек измерений.

*Подмодель данных «Измеренные данные»* хранит сигналы, термограммы, диаграммы давления, а также информацию об условиях и времени проведения измерений. Состоит из следующих сущностей:

- «Журнал измерений» – сущность, группирующая полученные данные измерений по проводимым обследованиям оборудования, здесь фиксируются условия, в которых проводились измерения (величина мощности ДГУ во время измерений, скорость вращения вала в об/мин, температура окружающего воздуха и атмосферное давление в помещении ДГУ, марка топлива, используемого во время измерения), а также начало и конец всего сеанса измерений;

- «Данные измерений» – сущность, в которой регистрируются файлы с данными измерений, полученных из конкретных точек измерений;

- «Тип данных» – справочник типов сигналов.

*Подмодель данных «Обработка данных»* предназначена для размещения результатов расчетов с сохранением информации о том, откуда были взяты данные для расчетов. При этом регистрируется метод расчета, который использовался для получения результатов. Состоит из следующих сущностей:

- «Журнал расчета» – сущность, объединяющая сведения о проведенном расчете и массиве полученных в результате выходных данных;

- «Результат расчета» – сущность для хранения полученных в результате расчета выходных данных (спектры, огибающие сигналов, диаграммы давления, поля температур);
- «Тип результата» – сущность для справочника типа выходных данных, полученных в результате расчета;
- «Метод расчета» – сущность для справочника методов расчета.

#### Информационные функции ИИДС

В ИИДС реализованы следующие основные информационные функции:

- 1) ИФ1 – ввод данных;
- 2) ИФ2 – обработка данных;
- 3) ИФ3 – работа с БД;
- 4) ИФ4 – визуализация;
- 5) ИФ5 – формирование документов;
- 6) ИФ6 – диагностирование программно-технических средств ИИДС;
- 7) ИФ7 – информационная поддержка оператора.

Вспомогательные информационные функции ИИДС:

- 1) ИФ8 – информационная безопасность;
- 2) ИФ9 – регистрация действий пользователей;
- 3) ИФ10 – резервное копирование БД;
- 4) ИФ11 – связь с внешним персональным компьютером;
- 5) ИФ12 – печать.

Лингвистическое обеспечение представляет собой совокупность языковых средств описания (спецификации) алгоритмов решения задач, обеспечения интерактивного диалога системы с оператором.

Лингвистическое обеспечение используется для:

- программирования задач – языки программирования;
- описания и манипулирования БД – языки соответствующих систем управления БД;
- описания и манипулирования графическими образными представлениями – языки соответствующих графических пакетов программ.

Для взаимодействия системы с персоналом использован русский язык.

Учитывая специфику диагностируемого оборудования, процедура регистрации обеспечивает сбор необходимой диагностической информации за короткий период очередного опробования.

Предложенная ER-модель и соответствующее программное обеспечение позволяет проведение измерительных и сервисных операций в реальном времени осуществления диагностических процедур.

## 4.2 Опытно-промышленные испытания ИИДС

### 4.2.1 Результаты испытаний ИИДС в штатном режиме диагностирования

Согласно договоренности с руководством предприятий, разработанная информационно-измерительная диагностическая система должна обеспечивать возможность проведения диагностических процедур, но с использованием штатных методов диагностики. Предполагалось, что сигналы каждого из измерительных каналов на первых этапах подвергаются обработке и анализу по существующим методам. В дальнейшем полученная информация использовалась для проведения комплексного диагностического анализа по разработанной методике преобразования сигналов в многомерном измерительном пространстве.

Для проведения виброконтроля беспроводные датчики в контрольных точках устанавливаются заранее. Проверяется наличие беспроводной связи между датчиками и ноутбуком. Возможна одновременная синхронная запись данных в 12 точках. Для сохранения результатов в соответствующих ячейках памяти регистрация производится в определенной последовательности. Запись осуществляется в течение 3 секунд. Имеется возможность просмотра данных во время регистрации.



Рисунок 4.4 – Установка датчиков VS-3D на дизель ДГМА-48М1

Ультразвуковой индикатор предназначен для выявления отклонений топливной аппаратуры и подшипников. Особенность ультразвукового метода в том, что зарегистрированные сигналы характеризуют процессы исключительно вблизи места регистрации, что позволяет локализовать дефекты.

Тепловизионному контролю подвергаются выхлопные патрубки цилиндров, трубки высокого давления, навесное оборудование, подшипники и токоведущие части генератора и др. Зарегистрированные температуры сохраняются в памяти регистрирующего прибора, затем переносятся в БД комплекса.

Регистрация ИД предусмотрена в ИИДС для дизелей следующих типов: 15Д-100, 12ZV40/48, ЗВЕЗДА-6000BC-MTU. Средством регистрации предназначено для динамической регистрации изменения давления в цилиндре двигателя в зависимости от угла поворота коленчатого вала двигателя. Прибор используется для обнаружения мест возможных неисправностей многоцилиндровых дизелей.

С использованием комплекса могут быть выявлены пять групп дефектов: «неисправность двигателя», «неисправность генератора», «неисправность турбокомпрессора», «неисправность масляного насоса», «неисправность водяного насоса».

Состояния «неисправность двигателя» и «неисправность генератора» могут быть определены по результатам ВК дизелей всех типов. Для определения состояния алгоритм диагностирования предусматривает расчет параметров виброперемещения, виброскорости, виброускорения в трех пространственных направлениях. Расчетные параметры (СКЗ, пик-факторы) сравниваются с граничными значениями, определяемыми нормативной документацией. Учитывается история вибродиагностирования объекта, тренд параметров. Предусматривается сравнение параметров в контролируемых точках дизеля и генератора между собой. На рисунке 4.5 представлено окно программы «Диагностика дизеля» для просмотра и анализа сигналов вибрации, зарегистрированных ИИДС.

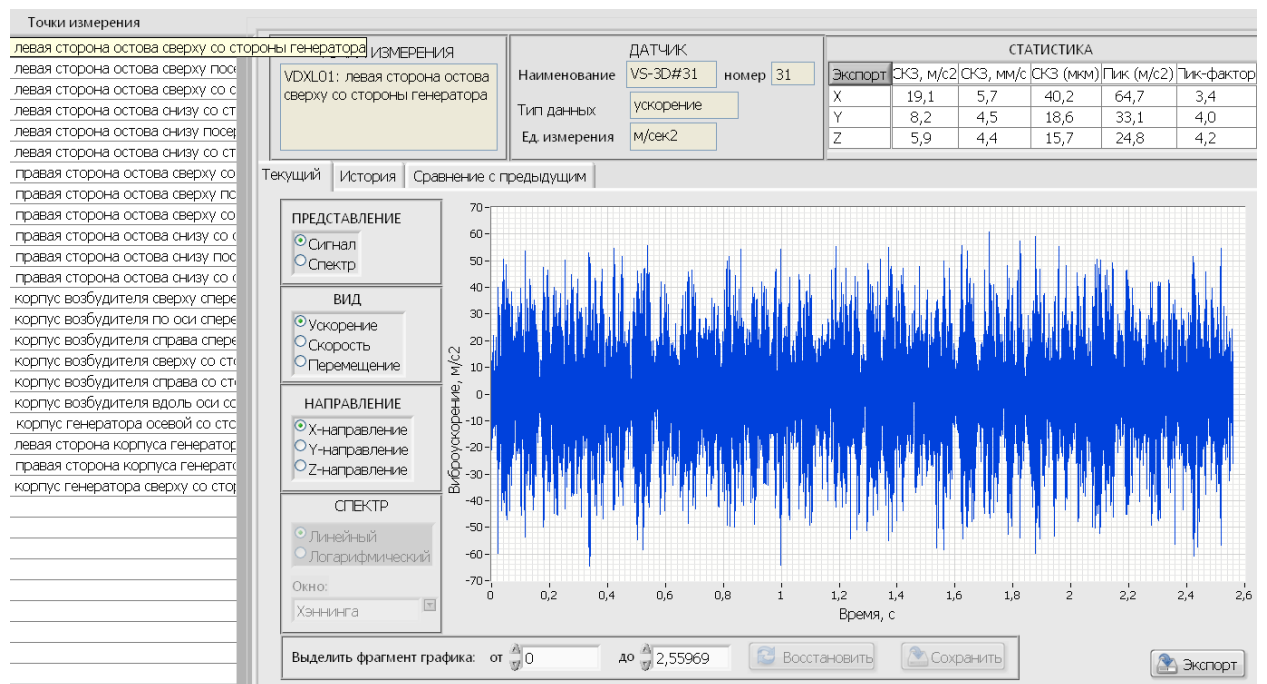


Рисунок 4.5 – Просмотр и визуальный анализ сигналов вибрации

Глубина диагностирования достигается использованием средств ультразвукового, тепловизионного контроля, контроля индикаторных диаграмм. Например, обработка ультразвуковых сигналов с использованием программного обеспечения комплекса предусматривает расчет СКЗ, пик-факторов, спектров (рисунок 4.6). Однородные параметры, - например, СКЗ на всех форсунках, -



сравниваются друг с другом. Учитываются также результаты предыдущих испытаний.

Оценка технического состояния по результатам ВК является первичным этапом контроля технического состояния ДГУ, производится в период планового ежемесячного опробования оборудования и основывается на регистрации и экспресс-анализе сигналов вибрации. Если по результатам ВК выявлено превышение нормативных параметров вибрации для данного типа дизеля или генератора, рекомендуется проведение полного контроля сразу после первичного с целью локализации дефекта и выдачи рекомендаций по проведению ремонта. После устранения дефекта рекомендуется повторное полное обследование, и, в случае отсутствия отклонений, возвращение к исходной последовательности проверок: ежемесячное первичное и ежегодное полное обследование.

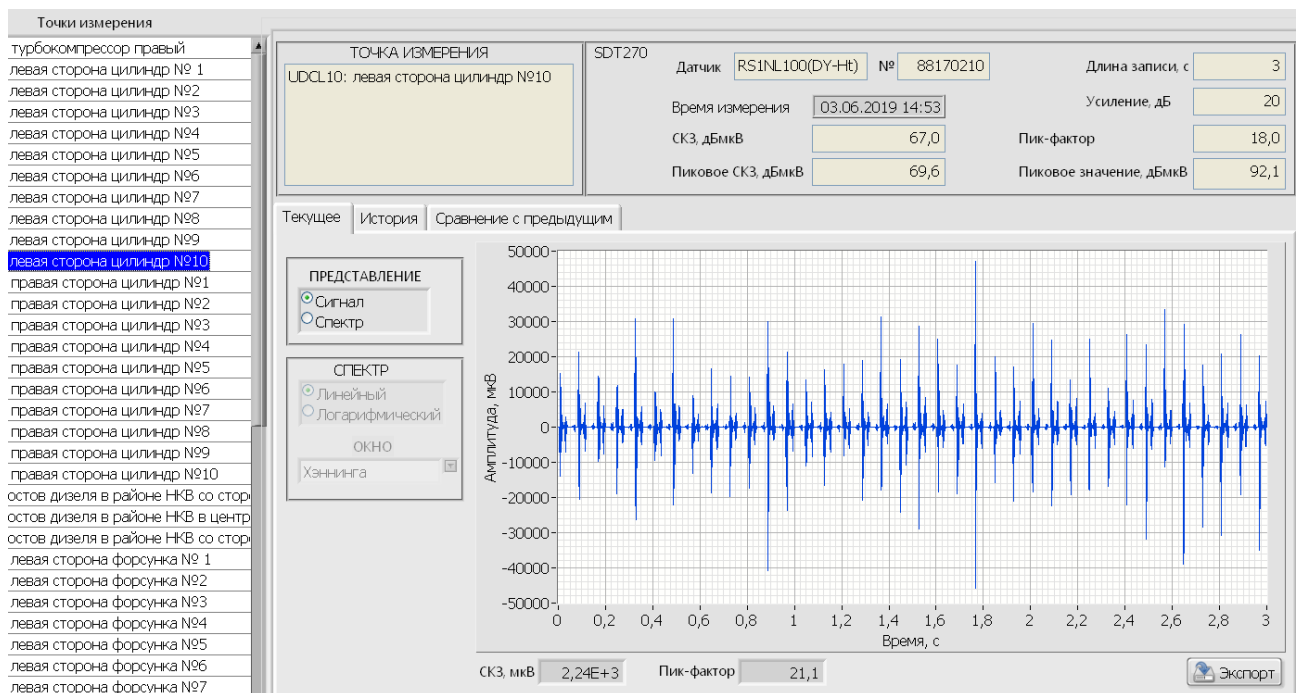


Рисунок 4.6 – Просмотр и анализ ультразвуковых сигналов

Оценка вибрационного состояния по результатам экспресс-анализа и сравнения с предыдущим ВК осуществляется по трем основным критериям:

- по абсолютному значению СКЗ виброскорости;
- по изменению значения СКЗ виброскорости;



— по положению относительно предыдущего состояния в пространстве главных компонент.

Оценка технического состояния по результатам УЗП является вторым этапом контроля технического состояния ДГУ, производится в период работы оборудования на мощности и основывается на регистрации и анализе ультразвуковых сигналов.

Прибор SDT270 сохраняет в файл результат гетеродинного преобразования исходного узкополосного ультразвукового сигнала, частота дискретизации демодулированных таким образом данных – 8 кГц (рисунок 4.7). При демодуляции из сигнала убирают постоянную составляющую, а при сохранении данных в формате WAV пропадает и информация об амплитуде данных.

Согласно штатной методике, в отношении результатов ВК и УЗП реализуется процедура сравнения, направленная на выявление скрытых тенденций в изменении состояния объекта диагностирования. Для проведения данной процедуры в БД должны быть сохранены сигналы, соответствующие текущей процедуре диагностирования, и результаты диагностирования исправных ДГУ данного типа.

Процедура экспресс-анализа результатов контроля УЗП аналогична процедуре анализа результатов ВК. Обработка производится в соответствии с реализуемым ИИДС алгоритмом вычисления УЗП. При повторном контроле из базы данных запрашиваются результаты предыдущих обследований. Отличие процесса обработки данных в блоке «Сравнение с предыдущим» заключается в процедуре децимации, которая реализуется для УЗП. Результат формируется по итогам сравнения с нормативными параметрами и предыдущими результатами при повторном диагностировании данной единицы оборудования. Итоги и выводы по результатам анализа УЗП совместно с результатами ТВК заносятся в карту контроля как результат второго этапа диагностирования.

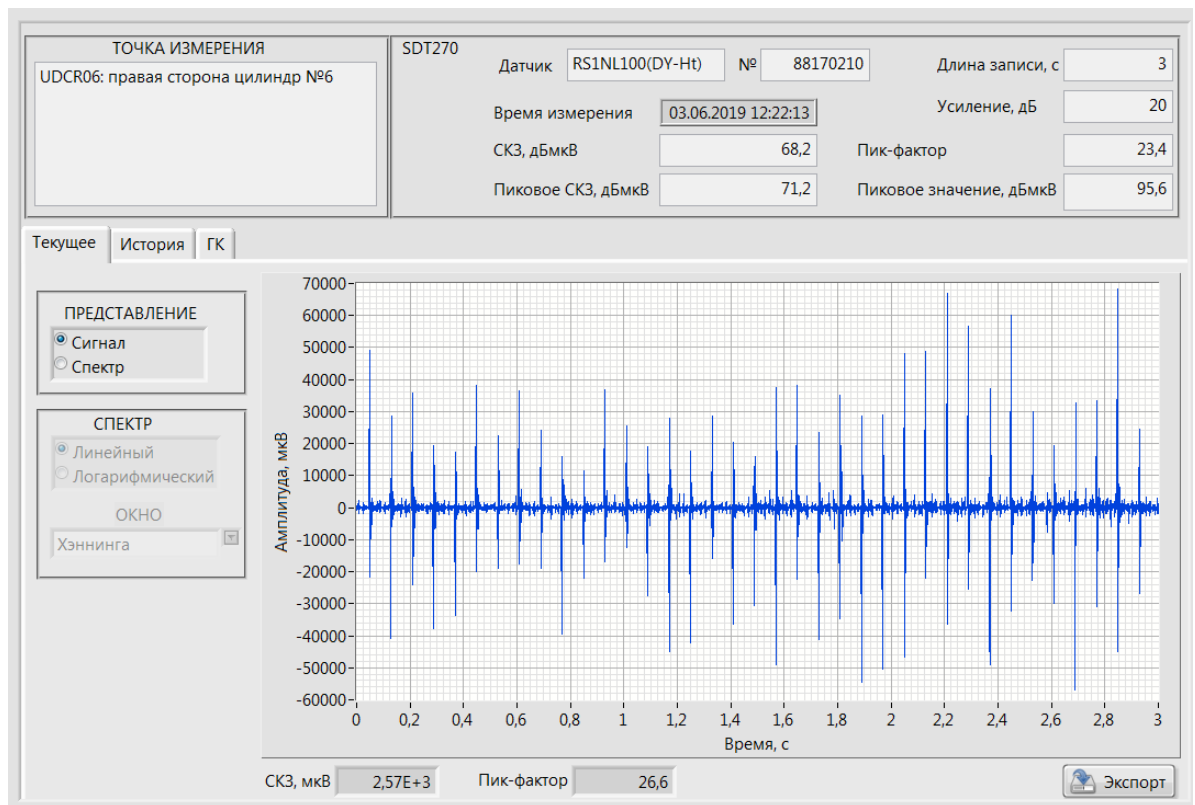


Рисунок 4.7 – Обработка ультразвуковых данных

Результат сравнения демонстрируется в специальном окне программы (рисунок 4.8) в виде кластеров анализируемых и предыдущих данных в пространстве главных компонент.

Мера соответствия анализируемого состояния предыдущему определяется в процентах [50]. Нормативный интервал формируется как диапазон изменения характеристик предыдущего значения. Попадание более 50% характеристик анализируемого состояния в нормативный интервал является признаком, по которому формируется сообщение «Анализируемый сигнал в целом соответствует предыдущему». Если более 50% анализируемых характеристик оказываются вне верхней границы интервала, то это может быть признаком ухудшения состояния, и оператор получает сообщение «Анализируемый сигнал не соответствует предыдущему (тренд положительный/отрицательный)». Если более половины анализируемых характеристик меньше нижней границы, то такая ситуация трактуется как изменения без ухудшения (после проведения ремонта или приработки), и ИИДС выдает сообщение «Анализируемый сигнал не соответствует предыдущему (тренд отрицательный)».

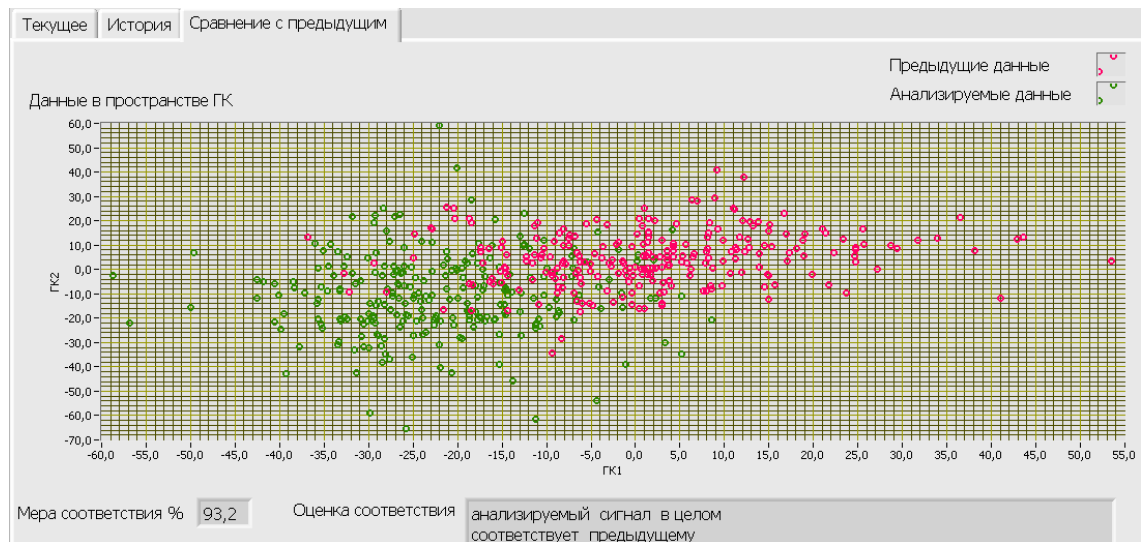


Рисунок 4.8 – Просмотр результатов сравнения ультразвукового сигнала с предыдущим измерением в той же точке

В диагностической процедуре предусмотрена регистрация и экспресс-анализ термографических изображений. Обработка термограмм производится оператором ИИДС вручную путем визуального определения температур контролируемых деталей, выбора на термограмме точек, соответствующих интересующим деталям оборудования, путем нажатия кнопки мыши в соответствующем месте термограммы и сохранения данных в памяти ИИДС (рисунок 4.9).

При проведении ТВК основной задачей является оценка равномерности работы топливной аппаратуры. С этой целью предусматривается контроль выхлопных патрубков цилиндров и других областей. Температуры патрубков сравниваются между собой, значительное различие температур является признаком неравномерности.

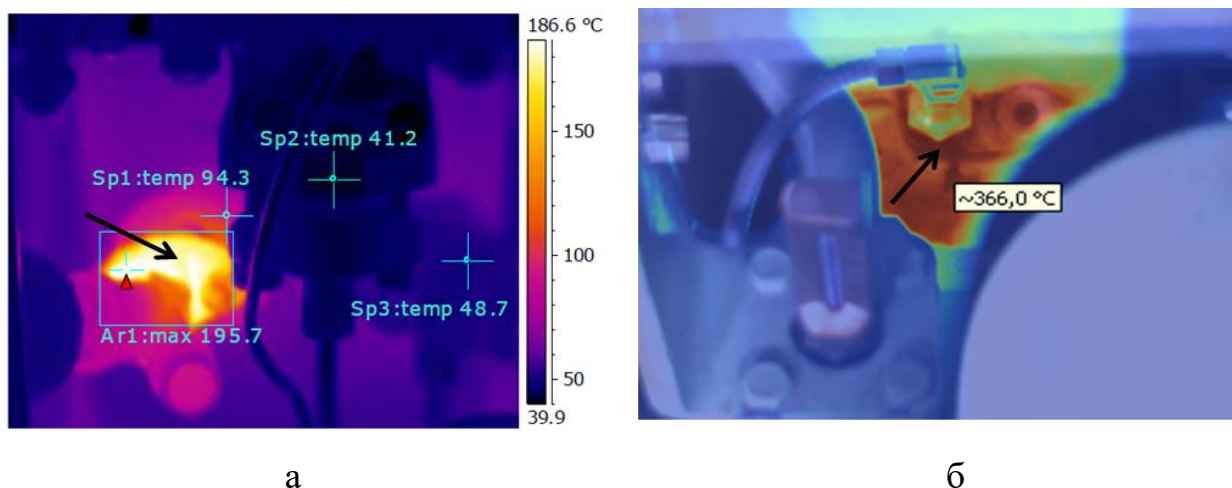


Рисунок 4.9 – Выхлопные патрубки цилиндров с указанием мест, которые должны быть выбраны оператором: ДГУ типа 15Д-100, ДГУ типа 12ZV40/48

По результатам измерений автоматически определяется максимальная температура контролируемых объектов, как показано на рисунке 4.10. Алгоритм работы комплекса предусматривает сравнение температур однородных объектов между собой.

При оценке состояния температуры и разности температур сравниваются с нормативными значениями. Учитываются результаты предыдущих телевизионных измерений.

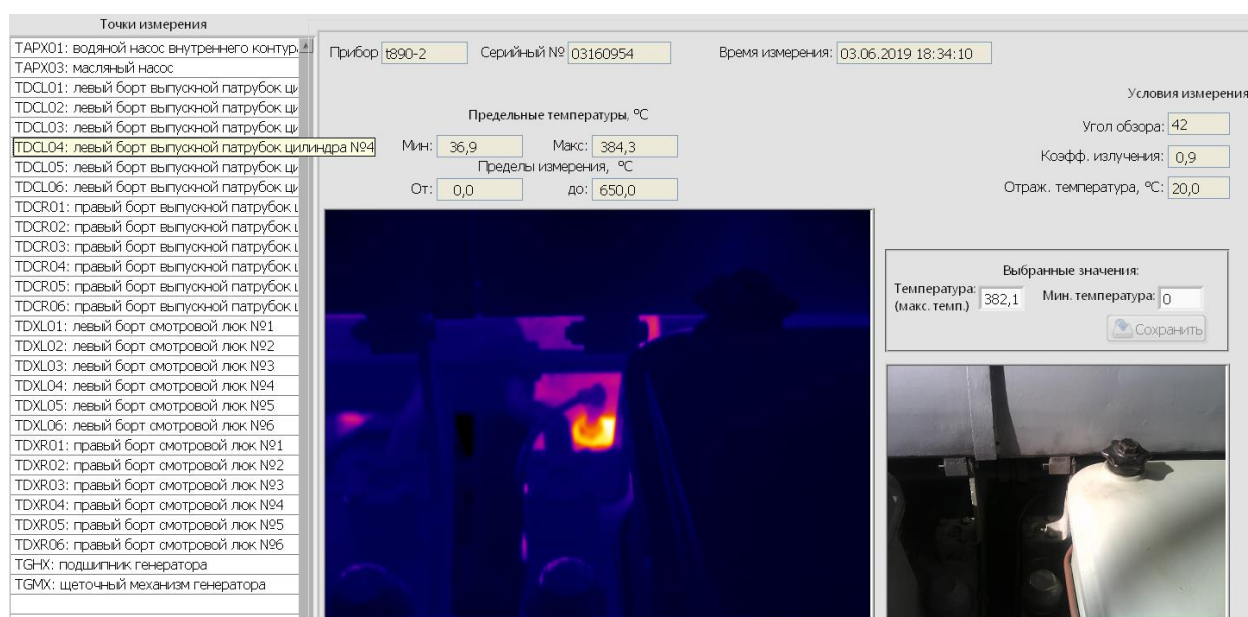


Рисунок 4.10 – Просмотр и анализ термограмм

Оценка технического состояния ДГУ по результатам ТВК совместно с контролем УЗП относится ко второму этапу контроля технического состояния ДГУ и производится в период работы оборудования на номинальной мощности (ввод оборудования в работу после ППР).

По результатам регистрации ИД определяется дефект – отклонения в рабочем процессе отдельного цилиндра. В диалоговом окне ИИДС (рисунок 4.11) отображаются на одном графике максимальная, минимальная и средняя ИД, максимальные давления сгорания в цилиндрах  $P_z$ .

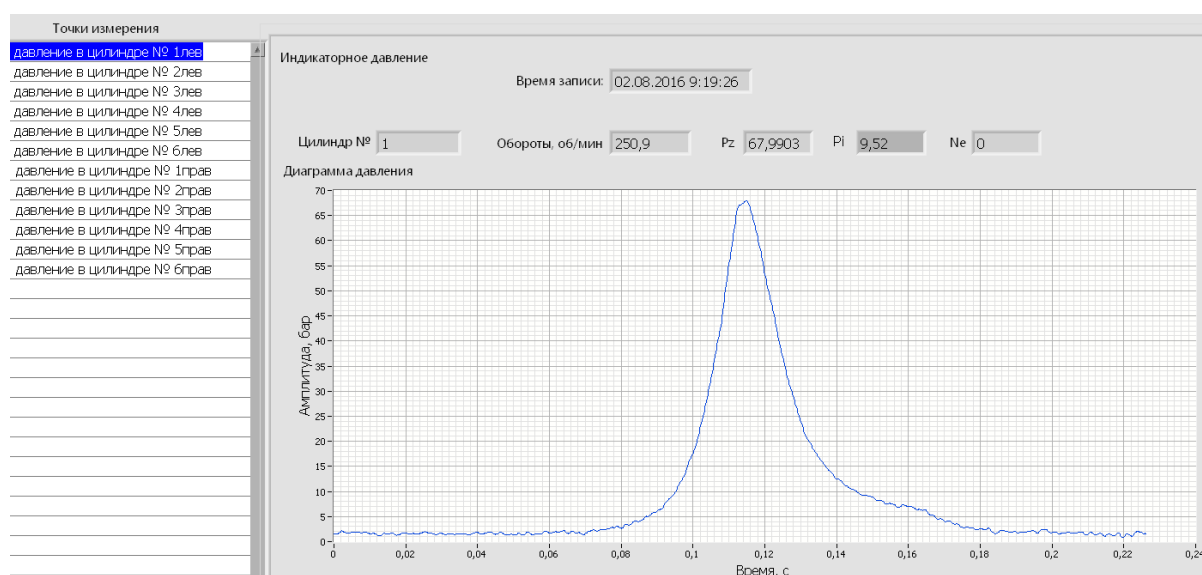


Рисунок 4.11 – Просмотр и анализ индикаторных диаграмм

При повторном диагностировании из БД запрашиваются результаты предыдущего диагностирования.

По всем видам контроля комплексом автоматически формируется заключение в виде протоколов. Заключение о состоянии дизеля-генератора объединяет результаты автоматической обработки и экспертные оценки. Анализ спектров и анализ огибающих ультразвуковых и вибрационных сигналов выполняется операторами комплекса.

Обработка производится в соответствии с реализуемым ИИДС алгоритмом вычисления показателей ИД. При повторном диагностировании из базы данных запрашиваются результаты предыдущего диагностирования. По результатам анализа может быть выявлен дефект «отклонения в рабочем процессе отдельного

цилиндра». Результат формируется по итогам сравнения с нормативными параметрами, которые указаны в паспортах оборудования и предыдущими результатами при повторном диагностировании данной единицы оборудования. Итоги и выводы по результатам анализа ИД совместно с результатами УЗП и ТВК могут заноситься в карту контроля.

Многоканальной информационно-измерительной диагностической системой были проведены испытания дизель-генераторных установок атомных электростанций таких как Смоленская АЭС, Ростовская АЭС, Балаковская АЭС, Нововоронежская АЭС. Были проведены диагностические испытания таких дизель-генераторных установок как: 3ВЕЗДА-6000BC-MTU, 12ZV40/48+S2445-12, 15Д-100, АСД-5600. Для диагностики всех типов ДГУ были разработаны регламенты проведения диагностических процедур. Вся диагностическая информация собрана в единую базу данных с возможностью выгрузки проектов протоколов диагностики. Данная база может наполняться по мере получения новых диагностических данных.

На Нововоронежской АЭС 28.11.2019 года была проведена диагностика дизель-генераторной установки 4ДГ-1 типа 15Д-100, установленной на 4 энергоблоке. В состав данной ДГУ входит дизель типа 10ДН207/2х254, генератор типа СГДС15-54-8У4. В процессе мониторинга измерения проводились по четырем измерительным каналам: измерение вибрации, измерение ультразвуковых параметров, измерение температуры, измерение динамического давления в цилиндрах дизеля.

Измерение вибрации производилось в 17 точках ДГУ с помощью датчиков вибрации трехкомпонентных VS-3D. Проверка соответствия показателей вибрации нормативным значениям проводилась согласно ГОСТ 31349-2007 (не более 720 мкм, 45 мм/с и 28м/с<sup>2</sup> на дизеле; 290 мкм, 18 мм/с и 11 м/с<sup>2</sup> на генераторе) [70]. Результаты мониторинга сигналов вибрации сведены в таблицу Д.1 (Приложение Д).

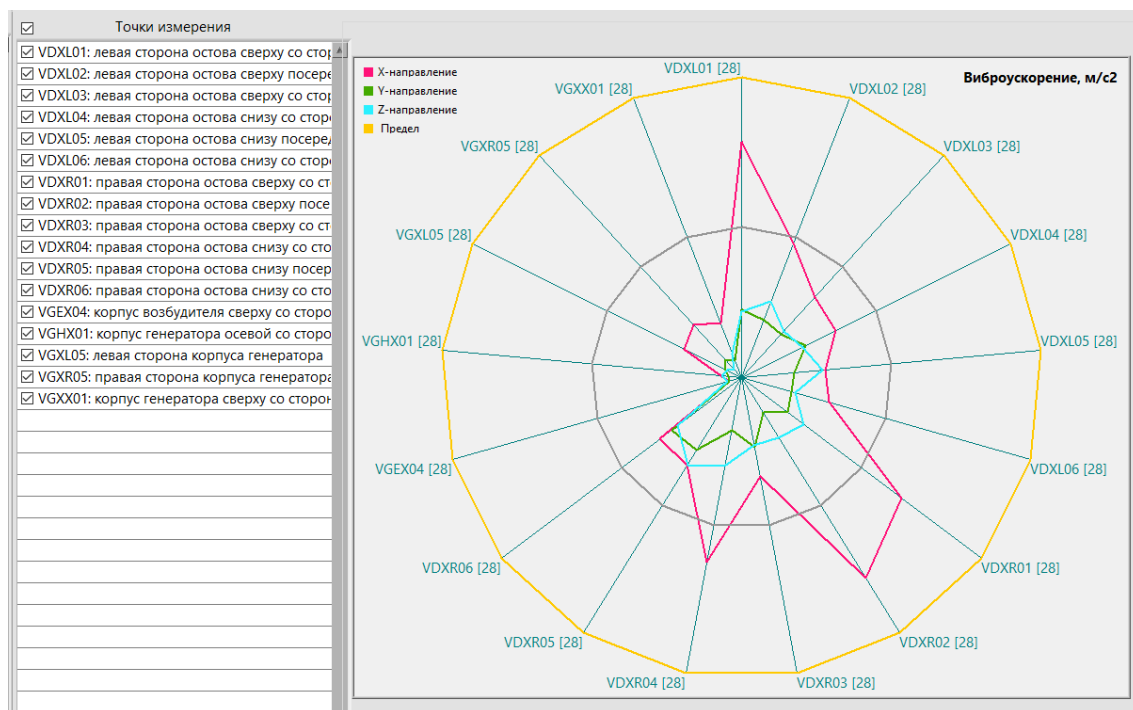


Рисунок 4.12 - Сопоставление нескольких вибрационных сигналов различных точек при диагностике 15Д-100

**По результатам обследования выявлено:** наибольшее значение вибрации дизеля - правая сторона остова снизу посередине; вибрация дизеля соответствует норме; нет значительного роста вибрации дизеля; наибольшее значение вибрации генератора - корпус генератора осевой со стороны выносного подшипника; вибрация генератора соответствует норме; нет значительного роста вибрации генератора.

Измерение ультразвуковых параметров проводилось в 65 точках с помощью прибора SDT-270. Оценочные критерии: соответствие различия СКЗ и пик-факторов ультразвуковых сигналов в пределах типовых групп допустимому значению. Результаты мониторинга ультразвуковых параметров сведены в таблицу Д.2 (Приложение Д)



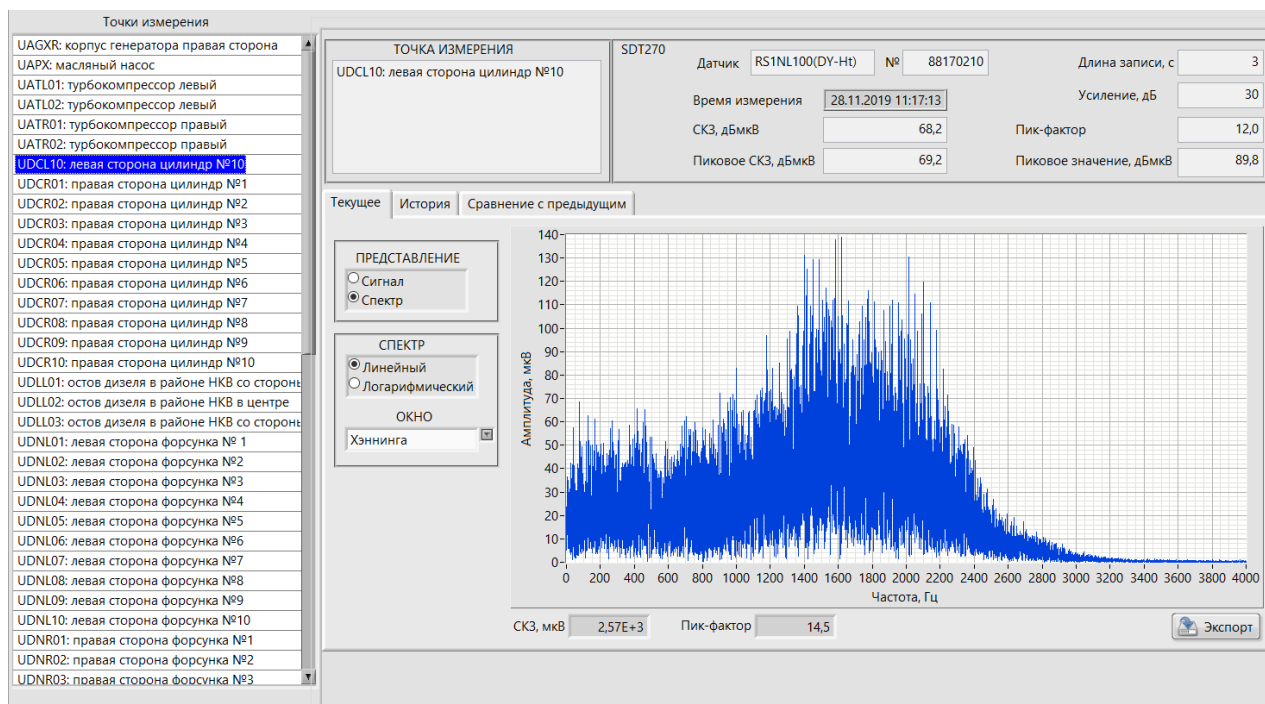


Рисунок 4.13 – Спектр ультразвукового сигнала с трубки цилиндра №10 левой стороны 15Д-100

По результатам обследования выявлено: на правой стороне ТНВД нет значительного разброса СКЗ; на форсунках нет значительного разброса СКЗ; на цилиндрах нет значительного разброса СКЗ; нет значительного роста СКЗ.

Мониторинг измерения температуры проводился в 44 точках. Для измерения и регистрации температурных параметров использован тепловизор Testo 890-2. Оценочные критерии: соответствие наибольших температур в каждой области допустимым значениям; соответствие наибольшей разницы температур. Результаты мониторинга температурных параметров сведены в таблицу Д.3 (Приложение Д).



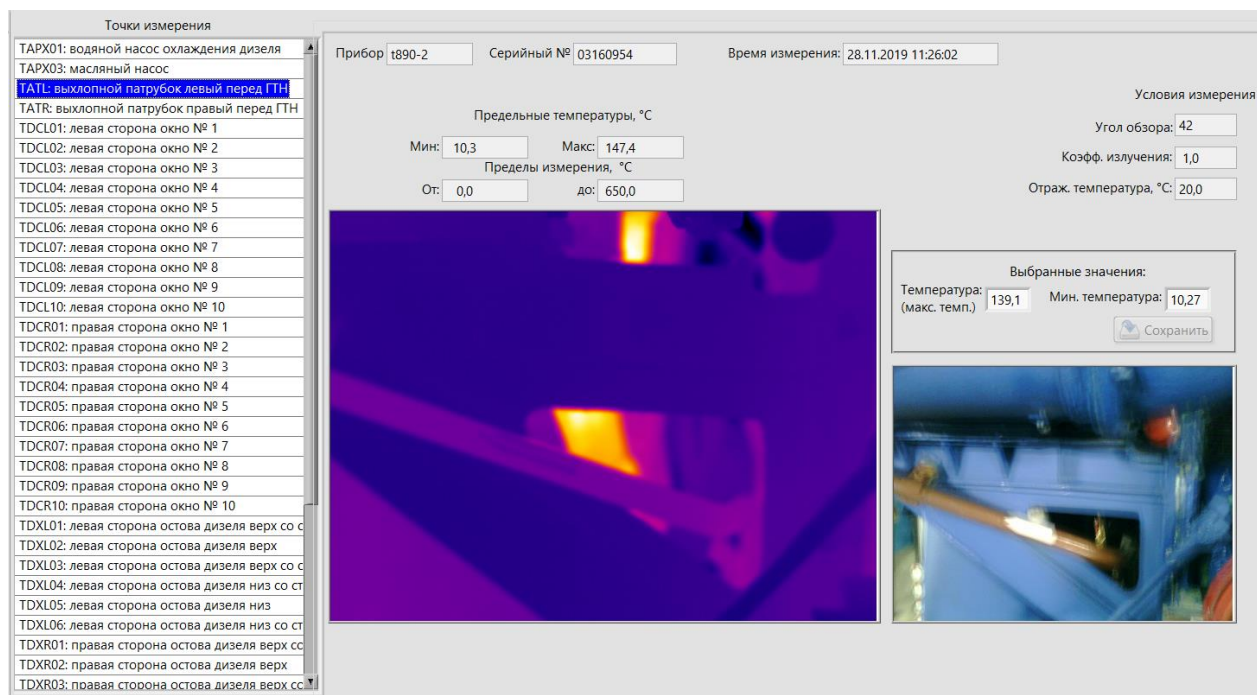


Рисунок 4.14 – Термограмма выхлопного патрубка перед ГТН 15Д-100

По результатам обследования термограмм выявлено:

- температура ТНВД соответствует норме;
- температура форсунок соответствует норме;
- температура цилиндров соответствует норме;
- температура ГТН НЕ соответствует норме! Температура выше нормы - выхлопной патрубок левый перед ГТН; температура выше нормы - выхлопной патрубок правый перед ГТН;
- температура остова соответствует норме;
- температура насосов соответствует норме;
- температура генератора соответствует норме;
- температура подшипников генератора соответствует норме;
- температура щеточного механизма соответствует норме;
- температура возбудителя соответствует норме;
- разброс температур ТНВД незначителен;
- разброс температур форсунок незначителен;
- разность температур на корпусах насосов соответствует норме.

Данная дизель-генераторная установка позволяет выполнить измерение динамического давления в цилиндрах дизеля. Для измерения и регистрации параметров индикаторных диаграмм использован прибор для снятия индикаторной диаграммы двигателя ELPI 0-25МПа. Оценочные критерии: проверка соответствия максимальных давлений в цилиндрах нормативным значениям; проверка разброса давлений между цилиндрами. Результат измерения динамического давления 15Д-100 сведен в таблицу Д.4 (Приложение Д)

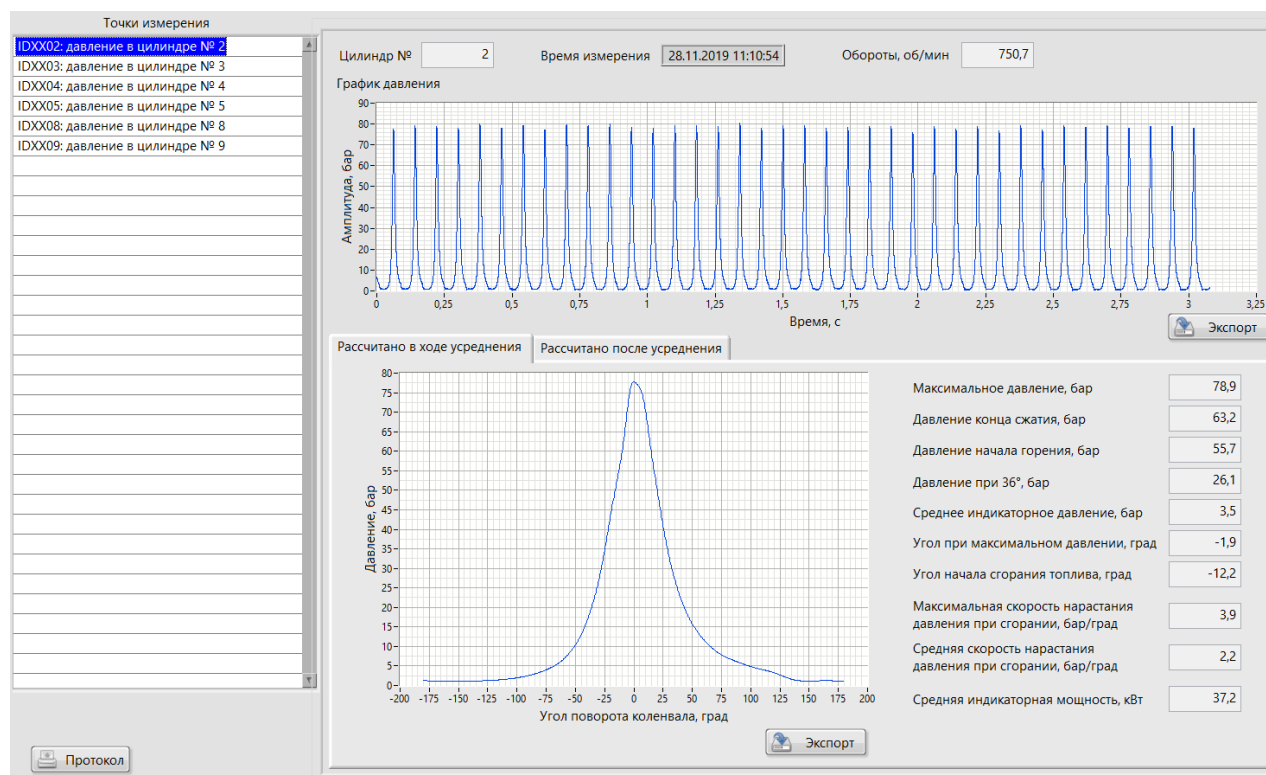


Рисунок 4.15 - Измерение динамического давления в цилиндре №2 ДГУ 15Д-

По результатам обследования выявлено:

- максимальное давление - давление в цилиндре № 2;
- давление цилиндров соответствует норме;
- наибольшее среднее давление - давление в цилиндре № 4;
- рост максимального давления незначительный.

По результатам комплексного анализа дизель-генераторная установка 15Д-100 признана годной к эксплуатации. При следующем ТО рекомендовано

обратить внимание на газотурбонагнетатель в связи с превышением рабочей температуры.

На Нововоронежской АЭС 14.12.2020 года была проведена диагностика дизель-генераторной установки 5ДГ-2, установленной на 5 энергоблоке. В состав данной ДГУ входит дизель типа 12ZV40/48, генератор типа S2445-12. В процессе мониторинга измерения проводились по четырем измерительным каналам: измерение вибрации, измерение ультразвуковых параметров, измерение температуры, измерение динамического давления в цилиндрах дизеля. Результаты диагностики представлены в приложении Д, таблицы Д.5-Д.8.

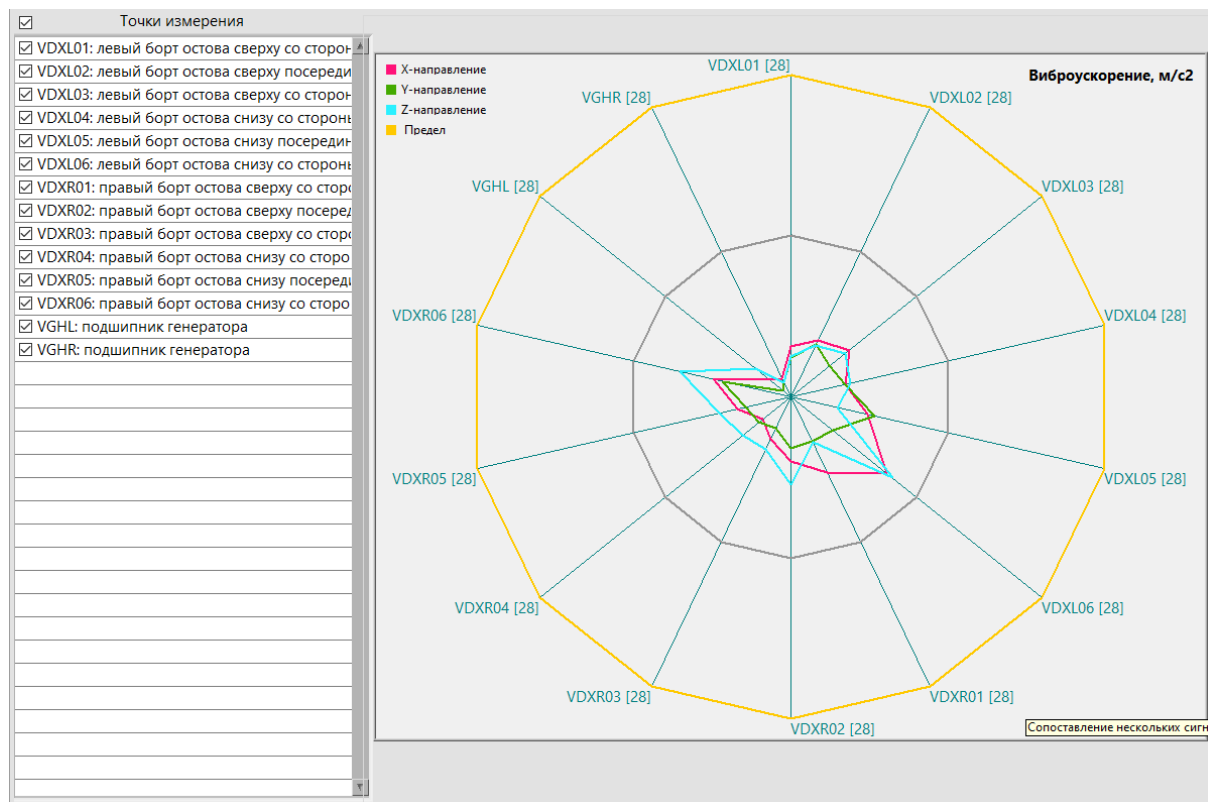


Рисунок 4.16 - Сопоставление нескольких вибрационных сигналов различных точек при диагностике 12ZV40/48+S2445-12

По результатам обследования выявлено: наибольшее значение вибрации дизеля - правый борт остова сверху со стороны генератора в районе предельного выключателя; вибрация дизеля соответствует норме; нет значительного роста вибрации дизеля; наибольшее значение вибрации генератора - подшипник

генератора; вибрация генератора соответствует норме; нет значительного роста вибрации генератора.

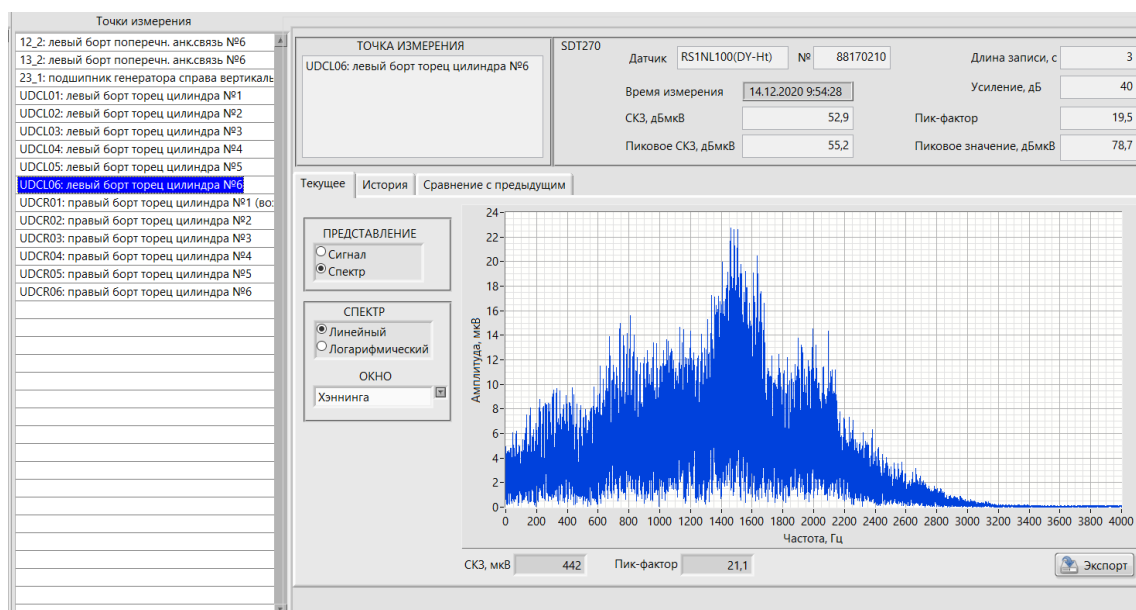


Рисунок 4.17 - Спектр ультразвукового сигнала левого цилиндра №6

По результатам обследования выявлено:

- на ТНВД нет значительного разброса СКЗ;
- на цилиндрах значительный разброс СКЗ;
- на анкерных связях нет значительного разброса СКЗ;
- нет значительного роста СКЗ.

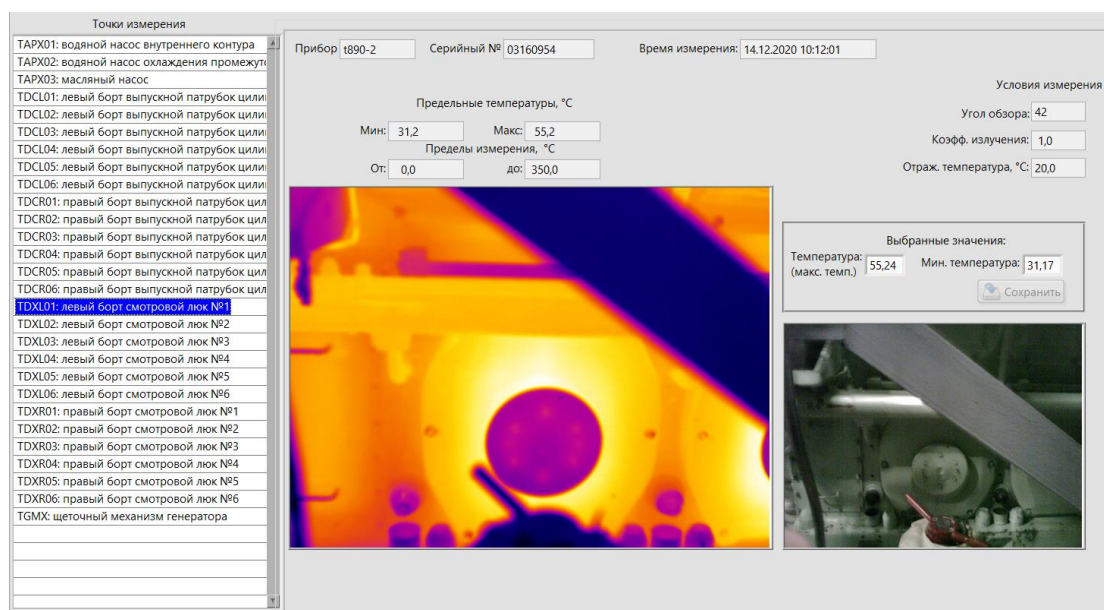


Рисунок 4.18 – Термограмма смотровой люк №1 левый борт

По результатам обследования выявлено:

- температура ТНВД соответствует норме;
- температура цилиндров соответствует норме;
- температура смотровых лючков соответствует норме;
- температура насосов соответствует норме;
- температура насосов соответствует норме;
- температура насосов соответствует норме;
- температура генератора соответствует норме;
- температура подшипников генератора соответствует норме;
- температура щеточного механизма соответствует норме;
- разброс температур ТНВД незначителен.

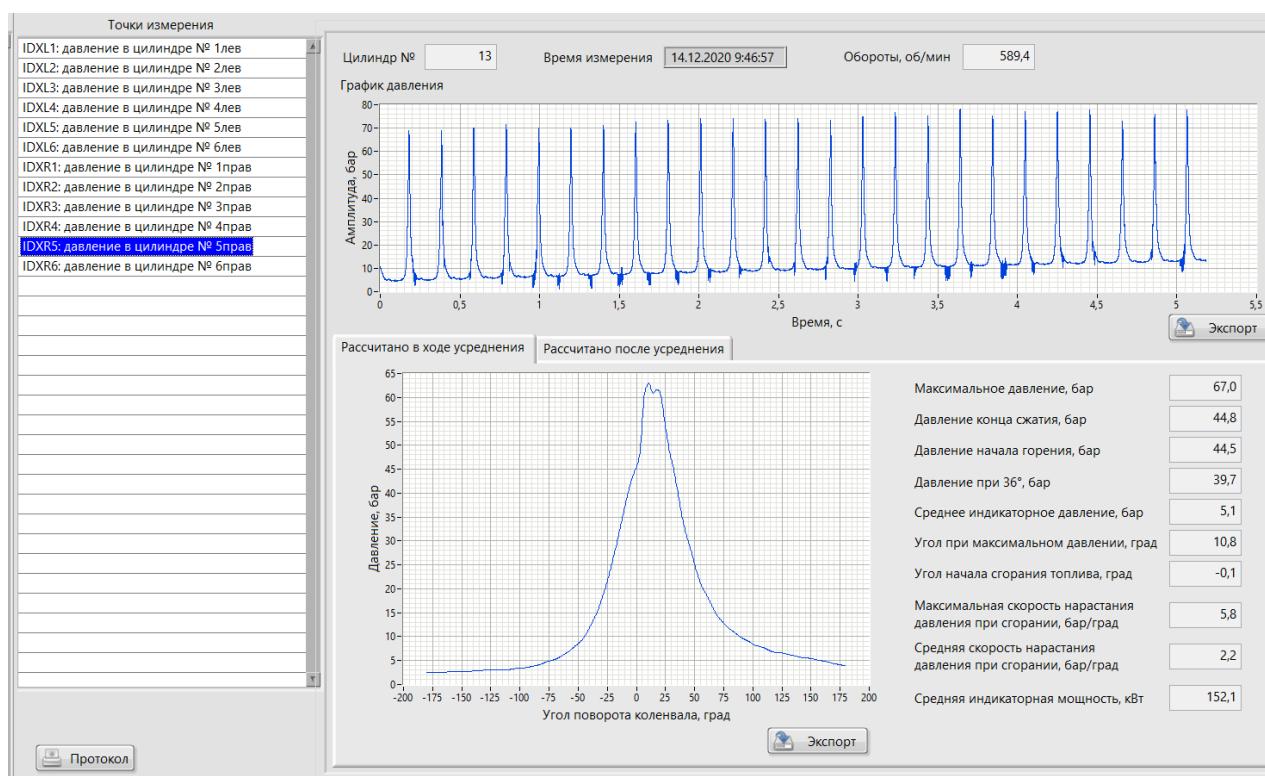


Рисунок 4.19 - Измерение динамического давления в цилиндре №5 правый

В результате комплексной оценки ДГУ признана работоспособной. Рекомендовано при следующем ТО обратить внимание на ЦПГ в связи со значительным разбросом СКЗ по результатам ультразвукового мониторинга и температурного контроля.

Одновременная регистрация нескольких видов диагностических сигналов, позволяет проводить комплексную оценку путем представления данных в  $n$ -мерной области. Величина расстояния между выборками данных, зарегистрированных на однотипном оборудовании или на одном оборудовании в разное время, является комплексным показателем изменения состояния оборудования. Вычисление центров кластеров и расстояний между ними реализовано в программном обеспечении ИИДС.

#### 4.2.2 Комплексная оценка состояния ДГУ с использованием многомерного измерительного пространства

В качестве примера рассмотрим комплексную оценку состояния трех однотипных дизель-генераторных установок Нововоронежской АЭС. Результаты диагностирования представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результат диагностирования ДГ1, ДГ2, ДГ4

Параметр	ДГ1	ДГ2	ДГ4
СКЗ УЗК 1, мм/с <sup>2</sup>	35	32	33
T1, °C	191,4	318,6	163
СКЗ УЗК 2, мм/с <sup>2</sup>	36	31	34
T2, °C	182	251,8	178
СКЗ УЗК 3, мм/с <sup>2</sup>	34	36	36
T3, °C	151,5	301,4	177
СКЗ УЗК 4, мм/с <sup>2</sup>	34	34	37
T4, °C	127	234,6	177
СКЗ УЗК 5, мм/с <sup>2</sup>	34	35	37
T5, °C	134	282,1	193
СКЗ УЗК 6, мм/с <sup>2</sup>	38	33	32
T6, °C	190	295,3	172
СКЗ УЗК 7, мм/с <sup>2</sup>	34	27	30
T7, °C	160,4	365,8	199
СКЗ УЗК 8, мм/с <sup>2</sup>	38	31	30
T8, °C	134,3	349,8	185
СКЗ УЗК 9, мм/с <sup>2</sup>	37	34	32
T9, °C	195,3	377,6	248
СКЗ УЗК10, мм/с <sup>2</sup>	34	28	33
T10, °C	191,4	288,2	202
Примечания Т-температура, СКЗ УЗК – средне-квадратичное значение ультразвуковых сигналов			

При отображении результатов диагностирования в физических параметрах наблюдается наложение кластеров, что может трактоваться как отсутствие отклонений в работе ДГУ (рисунок 4.21)

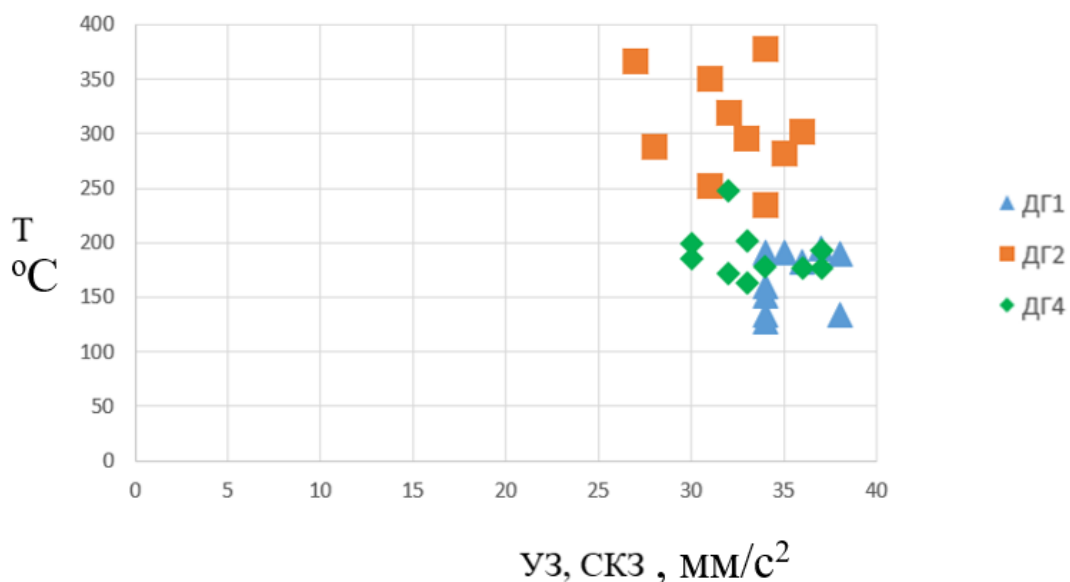


Рисунок 4.21 – Комплексная оценка технического состояния ДГУ

Исходные данные были подвергнуты сингулярному разложению с получением соответствующих матриц:  $[X]_{a \times b} = [Q]_{b \times b}[D]_{b \times a}[G]_{a \times a}^T$

Результаты расчетов сведены в таблицу

Координаты точек в пространстве главных компонент обрабатываемых параметров приведены к виду:

ДГ1	ГК1	ГК2	ДГ2	ГК1	ГК2	ДГ4	ГК1	ГК2
1	275,6344	270,7494	1	443,8893	430,1081	1	301,027	300,3041
2	282,4225	241,3161	2	488,7565	381,5536	2	310,7141	254,8014
3	278,9774	268,0497	3	436,6596	433,8789	3	301,1717	293,34
4	255,8638	291,291	4	388,7612	488,5066	4	270,4961	325,6182
5	287,3629	276,9039	5	465,0652	443,4181	5	325,1495	293,3794
6	256,402	292,7933	6	391,7709	487,2819	6	279,2117	322,8342
7	271,4348	274,002	7	436,3204	423,8873	7	302,5706	285,0401
8	265,6033	301,7119	8	418,74	483,8716	8	292,1156	328,0381
9	207,3773	301,7087	9	334,5477	513,6272	9	235,4668	345,0996
10	284,7076	237,3723	10	478,7828	373,9231	10	314,9985	262,9352



После преобразования данных и представления их пространстве главных компонент, видны конфигурации кластеров по которым можно визуально оценить степень неисправности ДГУ (рисунок 4.22).

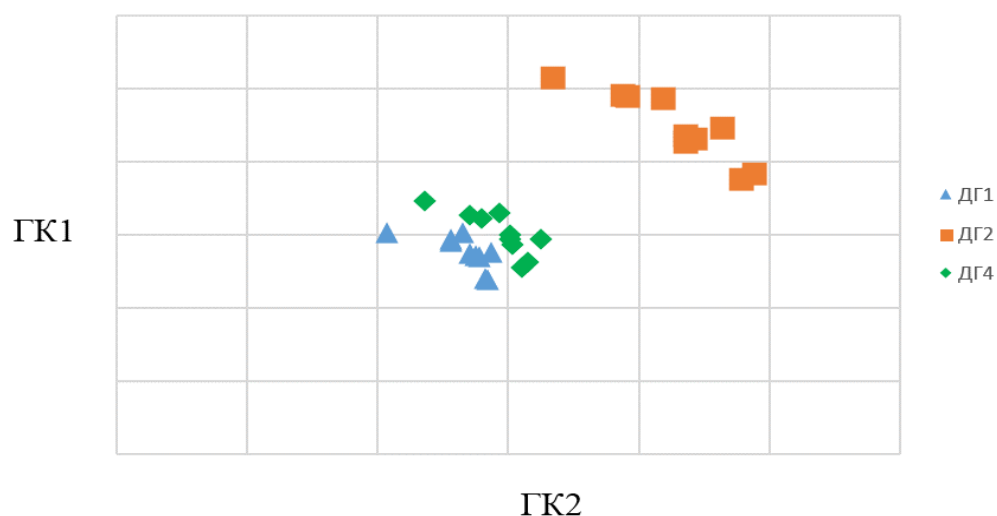


Рисунок 4.22 – Комплексная оценка технического состояния ДГУ в пространстве ГК

ИИДС была испытана с участием сотрудников отдела технической диагностики Нововоронежской АЭС.

Таблица 4.2 – Испытания ИИДС на ДГУ

№	Дата	Объект	Модель ДГУ
1.	20.05.2015	РоАЭС, 2РДС-2	12ZV40/48+S2445-12
2.	28.10.2015	БалАЭС, 3ДГ-4,(5)	АСД-5600
3.	17.06.2015	НВАЭС, 4ДГ-6	15Д-100
4.	18.06.2015	НВАЭС, 4ДГ-7	15Д-100
5.	18.06.2015	НВАЭС, 4ДГ-8	15Д-100
6.	25.06.2015	НВАЭС, 4ДГ-2	15Д-100
7.	10.05.2017	НВАЭС, 5ДГ-1	12ZV40/48+S2445-12
8.	18.08.2017	НВАЭС, 6ДГ-2	3ВЕЗДА-6000BC-MTU
9.	15.05.2018	ВТГ, ТЭЦ-2	ДГМА-48M1
10.	27.09.2018	ВТГ, ТЭЦ-2	ДГМА-48M1
11.	03.06.2019	САЭС, 1ДГ-3	12ZV40/48+S2445-12
12.	03.06.2019	САЭС, 3ДГ-4	15Д-100
13.	03.06.2019	САЭС, 3ДГ-5	15Д-100
14.	15.11.2019	ВТГ, ТЭЦ-2	ДГМА-48M1
15.	28.11.2019	НВАЭС, 4ДГ-1	15Д-100
16.	28.11.2019	НВАЭС, 4ДГ-2	15Д-100
17.	14.12.2020	НВАЭС, 5ДГ-2	12ZV40/48+S2445-12
18.	20.12.2021	ВТГ, ТЭЦ-2	ДГМА-48M1



Из таблицы 4.2 видно, что разработанная ИИДС была успешно испытана при диагностике 18ти ДГУ.

Благодаря данным испытаниям была создана первичная база данных, которая позволяет проводить в будущем сравнительный анализ данных установок.

Измерительные каналы были испытаны при диагностике дизель-генераторной установки Волгодонской ТЭЦ-2. Результаты экспериментальных исследований показали, что одновременное использование нескольких измерительных каналов дает возможность обнаружения дефектов на более ранних стадиях развития по сравнению с локальными штатными системами контроля, о чем свидетельствует протокол испытаний, проведенных в условиях Волгодонской ТЭЦ-2.

Опытно-промышленными испытаниями, проведенными в ОАО «Волгодонская тепловая генерация» установлено (Приложение Г):

- по результатам оценки параметров вибрации не выявлено отклонений;
- по результатам сравнения тепловизионных параметров с нормативными значениями не выявлено отклонений;
- по результатам сравнения ультразвуковых параметров с результатами предыдущих испытаний не выявлено отклонений;
- по результатам обработки комплекса измеренных сигналов с применением анализа сингулярного спектра и метода главных компонент выявлено отклонение в работе топливной группы цилиндра №1. Путем разборной дефектации было подтверждено наличие дефекта «заедание регулирующего рычага топливного».

На ряде предприятий были оформлены акты внедрения методов, разработанного под руководством Абидовой Е.А., диагностирования дизель-генераторных установок с применением ИИДС. В состав внедренных методов вошли элементы разработанной методики диагностирования ДГУ.

Таким образом теоретические результаты и инженерные решения, заложенные в конструкцию информационно-измерительной диагностической системы, получили экспериментальное подтверждение в опытно промышленных условиях.

## Выводы по главе 4

1 На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан и изготовлен опытно-промышленный образец информационно-измерительной диагностической системы. Ее функциональная работоспособность и эффективность подтверждена результатами испытаний в лабораторных и промышленных условиях.

2 Впервые в атомной энергетической отрасли осуществлена комплексная оценка состояния дизель-генераторных установок резервного питания путем одновременных измерений нескольких диагностических параметров. Экспериментально установлено изменение расположения кластеров данных в  $n$ -мерной области зарегистрированных в различное время, что подтвердило возможность комплексной оценки изменения состояния диагностируемого оборудования.

3 Программное обеспечение информационно-измерительной диагностической системы базируется на разработанной ER-модели содержащей шесть взаимосвязанных подмоделей, охватывающих все основные режимы работы: измерение, обработку и представление диагностических данных в реальном времени проведения диагностических процедур.

4 Обеспечение автоматизированного режима измерения и обработки диагностической информации может быть достигнуто разработкой ER-модели программного обеспечения, содержащей шесть взаимосвязанных подмоделей, охватывающих основные режимы работы аппаратно-программного комплекса диагностики дизель-генераторных установок.

5 Метрологическая аттестация измерительных каналов, проведенная специализированными метрологическими службами, показала возможность использования разработанной многоканальной информационно-измерительной диагностической системы в производственных условиях, регламентированных требованиями атомной энергетики.

6 Основные теоретические результаты, экспериментальные исследования и инженерные решения, заложенные в основу построения

информационно-измерительной диагностической системы, получили успешную апробацию в условиях: ООО «Волгодонская тепловая генерация» и Нововоронежской АЭС.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1 Повышение производительности и качества проведения диагностических процедур в рамках планово-предупредительных ремонтов оборудования АЭС может быть достигнуто использованием многоканальных автоматизированных информационно-измерительных диагностических систем, комплексным контролем состояния и более полной выявляемостью дефектов.

2 Теоретически обоснована целесообразность введения дополнительных критериев – изолируемости и идентифицируемости в методику построения структуры многоканальных информационно-измерительных диагностических систем, что позволяет оценить вклад измерительных каналов при выявлении дефектов дизель-генераторного оборудования.

3 Экспериментально подтверждено повышение чувствительности диагностических процедур за счет использования методов кластеризации измерительной информации и представления данных в пространстве главных компонент. Сопоставлением результатов обработки измерений получено увеличение расстояний между центрами кластеров эталонного и диагностируемого состояний оборудования с 0,11 в физических до 0,77 в относительных единицах пространства главных компонент.

4 Использование метода главных компонент уменьшающего размерность многомерного измерительного пространства при кластеризации диагностических сигналов в многоканальных информационно-измерительных диагностических системах обеспечивает выполнение требований визуального представления диагностической информации о процессе зарождения и развития дефектов оборудования.

5 Разработана ER-модель базы данных, содержащая шесть взаимосвязанных подмоделей, охватывающих основные режимы работы ИИДС мониторинга технического состояния дизель-генераторных установок и программное обеспечение реализующее автоматизированный режим измерения и обработки диагностической информации.

6 Результаты исследований различных типов дизель-генераторных установок подтверждают возможность использования многоканальной информационно-измерительной системы как с использованием штатных локальных диагностических процедур, так и комплексного многомерного анализа состояния оборудования в условиях, регламентированных требованиями атомной энергетики.

7 Основные теоретические результаты, экспериментальные исследования и инженерные решения, заложенные в основу построения информационно-измерительной диагностической системы, получили успешную апробацию в условиях: ООО «Волгодонская тепловая генерация» и Нововоронежской АЭС.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 ГОСТ 27.002—89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — Введ. 1990-07-01.— М.: Межгосударственный стандарт, 1989.— 32 с.
- 2 Скалозубов В.И., Билей Д.В, Габлая Т.В., и др. Развитие и оптимизация систем контроля атомных электростанций с ВВЭР /монография; НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС. – Чернобыль (Киев. Обл.): - Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. – 512 с.
- 3 Острейковский, В.А. Эксплуатация атомных станций / В.А. Острейковский – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928с.
- 4 Абидова Е.А., Пугачёва О.Ю., Никифоров В.Н., Синельщиков П.В., Бабенко Р.Г., Сиротин Д.В., Елзов Ю.Н. Цели и задачи организации диагностического мониторинга оборудования АЭС. Глобальная ядерная безопасность. – 2015. - № 3 (16). – С. 70-76.
- 5 Абидова Е.А., Лапкис А.А., Пугачева О.Ю., Никифоров В.Н., Елзов Ю.Н., Сиротин Д.В. Бабенко Р.Г. Информационный паспорт оборудования. Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс]: тез. докл. XII Междунар. науч.-практ. конф., 1-3 июня 2016 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск: [Б. и.], 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD).
- 6 Абидова Е.А., Пугачева О.Ю., Никифоров В.Н., Елзов Ю.Н., Синельщиков П.В. Система “Информационное сопровождение ремонтных кампаний АЭС”. Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс] : тез. докл. XII Междунар. науч.-практ. конф., 1-3 июня 2016 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск: [Б. и.], 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD).
- 7 Абидова Е.А., Никифоров В.Н. Пугачева О.Ю. Елзов Ю.Н. Соловьев В.И. Сиротин Д.В. Бабенко Р.Г. Лапкис А.А. Синельщиков П.В. Информационный паспорт оборудования АЭС. Сопровождение ремонтных кампаний. X Междунар. науч.-технич. конф., 16 - 19 мая 2017 г. / ОКБ «Гидропресс». – г. Подольск. Режим доступа:

<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/autorun/article66-ru.htm>. ISBN 978-5-94883-146-6.

- 8 Абидова Е.А., Пугачёва О.Ю., Чернов А.В. Повышение качества диагностических операций при проведении планово-предупредительных ремонтов оборудования АЭС. Безопасность ядерной энергетики : тез. докл. XV науч.-практ. конф., 6–8 июня 2019 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2019. – 1 электрон. опт. диск [CD]. – ISBN 978-5-7262-2569-2.
- 9 Абидова Е.А., Пугачёва О.Ю., Соловьёв В.И. Мониторинг состояния дизель-генераторной установки 15Д-100 посредством виброакустической диагностики. Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2015: сб. тез. и ст. науч.-практ. конф., 16–20 февр. 2015 г. - Волгодонск : ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2015. - С. 24-26.
- 10 Абидова Е.А., Пугачёва О.Ю., Соловьёв В.И. Результаты диагностирования дизеля 15Д-100 посредством виброакустического мониторинга и тепловизионного контроля. Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс] : тез. докл. XI Междунар. науч.-практ. конф., 27-29 мая 2015 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск: [Б. и.], 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD).
- 11 Абидова Е.А., Пугачёва О.Ю., Ремизов Р.И., Соловьёв В.И. Виброакустический мониторинг и тепловизионный контроль при диагностировании дизеля 12ZV40/48 Глобальная ядерная безопасность. - 2016. - № 2 (19). - С. 70-76.
- 12 Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1»/Р.В.Арутюнян, Л.А.Большов, А.А.Боровой, Е.П. Велихов; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. — М.: 2018. — 408 с.: ил. — ISBN 978-5-9907220-5-7 (в пер.)
- 13 Абидова Е.А., Булава В.А., Пугачёва О.Ю., Соловьёв В.И., Хегай Л.С., Чернов А.В. Диагностирование дизель-генераторного оборудования



- АЭС с использованием детерминированных и стохастических методов. Глобальная ядерная безопасность. - 2016. - № 3 (20). - С. 74-79.
- 14 Грушин В.А. Вибродиагностика технического состояния машинного оборудования методом обеляющего фильтра: дис. кандидата технических наук: 01.02.06 / Грушин Владимир Алексеевич; [Место защиты: Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н. А. Добролюбова]. - Нижний Новгород, 2006. - С. 152 .
  - 15 Стеклов, А.С. Прогнозирование технического состояния судовых электроэнергетических систем. А.С. Стеклов, А.В. Серебряков, В.Г. Титов. - «Вестник ИГЭУ» Вып. 5 2016 г. - С. 21-26.
  - 16 Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам // Учебное пособие. г. Пермь, 2012. С. 124-126
  - 17 Абидова, Е.А. и др. Методы обработки информации в диагностических системах [Текст]/ Е.А. Абидова, А.В. Чернов : Учебное пособие. - Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2013. - 72 с.
  - 18 Артоболевский И.И., Бобровницкий Ю.И., Генкин М.Д. Введение в акустическую динамику машин. М.: Наука, с.1979. – 296 С.
  - 19 Абидова Е.А., Соловьёв В.И. Пугачёва О.Ю. Пугачев А.К. Диагностирование дизель-генераторной установки АЭС по показателям вибрации Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс] : тез. докл. X Междунар. науч.-практ. конф., 28-30 мая 2014 г. – Волгодонск : ИПО ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2014. – С. 158-159.
  - 20 Абидова Е.А., Пугачева О.Ю., Соловьёв В.И., Ремизов Р.И., Печеневский А.А. Диагностирование дизель-генераторного оборудования АЭС по результатам виброконтроля и теплотметрии. Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс] : тез. докл. XII Междунар. науч.-практ. конф., 1-3 июня 2016 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск : [Б. и.], 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD).
  - 21 Муха Ю.П. Информационно-измерительные системы с адаптивными преобразованиями. Управление гибкостью функционирования :

- монография / Муха Ю.П., Авдеюк О.А., Королева И.Ю.; ВолгГТУ. - Волгоград, 2010. - 303 с.
- 22 Синтез сложных измерительно-вычислительных комплексов с развивающейся структурой : монография / Муха Ю.П., Поваров П.В., Королева И.Ю., Авдеюк О.А.; ВолгГТУ. - Волгоград, 2017. - 275 с.
- 23 Абидова Е.А., Бейсуг О.И., Драка О.Е. Пугачёва О.Ю., Дембицкий А.Е. Оценка состояния водного объекта в зоне размещения РоАЭС с использованием метода главных компонент Глобальная ядерная безопасность. – 2018. - № 4 (29). – С. 17-23.
- 24 Абидова Е.А., Пугачёва О.Ю., Бейсуг О.И., Дембицкий А.Е. Оценка экологического состояния водного объекта в зоне действия РоАЭС с использованием метода главных компонент. Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс] : тез. докл. XIV Междунар. науч.-практ. конф., 30 мая - 1 июня 2018 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгоград : [Б. и.], 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD).
- 25 Колмогоров, А.Н. Теория информации и теория алгоритмов / А.Н. Колмогоров – М.: Наука, 1987. – 584 с.
- 26 Леонтьева Н.Л. Многомерная гусеница, выбор длины и числа компонент гусеницы. Машинное обучение и анализ данных, 2013. Т. 1, №5. С. 5-15
- 27 Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. В 3 т. ; пер. с англ. В.Т. Горяинов. – М.: Советское радио, 1975. – 344 с.
- 28 Абидова Е.А., Бейсуг О.И., Дембицкий А.Е., Пугачёва О.Ю. Метод главных компонент в оценке экологического состояния дельты реки Дон. Системы обеспечения техносферной безопасности: тез. докл. V всероссийской. конф., 5–6 октября 2018 г. / Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону): ЮФУ, 2018. – С 99-101. – ISBN 978-5-9275-2887-5 .
- 29 Абидова Е.А., Бабенко Р.Г., Дембицкий А.Е. Повышение достоверности диагностических процедур при определении технического состояния

- электромеханического оборудования. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. - 2019. – № 4. - С. 106-112.
- 30 E.A. Abidova, A.V. Chernov, A.A. Lapkis. Bearing Defects diagnostics using the principal components analysis. IOP Materials Science Conference Series: Materials Science and Engineering, September 2019, Volume 680. doi:10.1088/1757-899X/680/1/012005(Scopus).
  - 31 Абидова Е.А., Романенко В.А., Подрезов Н.Н. Применение методов кластеризации для сравнительного анализа процессов электродуговой сварки. Безопасность ядерной энергетики : тез. докл. XV науч.-практ. конф., 6–8 июня 2019 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск : ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2019. – 1 электрон. опт. диск [CD]. – ISBN 978-5-7262-2569-2/
  - 32 Ганенкова, Е. Г. Функциональный анализ: основные классы пространств / Е. Г. Ганенкова, К. Ф. Амозова. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2013. – 26 с. 3.
  - 33 Ершов, К. С. Анализ и классификация алгоритмов кластеризации / К. С. Ершов, Т. Н. Романова. // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2016. – №19. – С. 274-279.
  - 34 Al Bugarbee, Hussein, Trendafilova, Irina. A methodology for fault detection in rolling element bearings using singular spectrum analysis [Электронный ресурс] // In: International Conference on Engineering Vibration 2017 (ICoEV 2017) – 4-7 September 2017, Sofia, Bulgaria – Режим доступа: <https://strathprints.strath.ac.uk/62663> - (дата обращения: 15.10.2018)
  - 35 Irina Trendafilova, David García Cava, Hussein Al-Bugarbee Data-Driven Methods for Vibration-Based Monitoring Based on Singular Spectrum Analysis. Vibration-Based Techniques for Damage Detection and Localization in Engineering Structures, pp.41-73
  - 36 Quan Wang, Kernel Principal Component Analysis and its Applications in Face Recognition and Active Shape Models/ T Quan Wang // Rensselaer Polytechnic Institute. – 2012.

- 37 Скоморохов, А. О. Кластерный анализ сигналов системы акустического контроля течи / А. О. Скоморохов, П. А. Белоусов, С.А. Морозов // Известия вузов. Ядерная энергетика. — 2006. — № 4. — С. 3–12.
- 38 Скоморохов, А. О. «SVMClass» — программа классификации результатов неразрушающего контроля оборудования АЭС на основе алгоритмов опорных векторов / А. О. Скоморохов, А. В. Нахабов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008613243 от 07.07.2008.
- 39 Шахнов В.А., Власов А.И., Князев В.С. Аппаратно-программный комплекс обработки сигналов для мониторинга и анализа состояния технических систем // 3-ая Международная конференция «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике». Москва. 18-21 марта 2002.
- 40 Widodo, A., & Yang, B. S. (2007). Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis. Mechanical Systems and Signal Processing, 21, 2560-2574.
- 41 Jianping Ma and Jin Jiang, “Semi-Supervised Classification for Fault Diagnosis in Nuclear Power Plants,” International Symposium on Future I&C for Nuclear Power Plants and International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems 2014, Jeju, Republic of Korea, Aug. 24-28, 2014
- 42 Головкин С. В. Алгоритмическое обеспечение судовых систем управления с упреждающей диагностикой отказов / С. В. Головкин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 1. — С. 28–31.
- 43 Поваров П.В. Метод проектирования развивающейся структуры сложной системы мониторинга [Текст] / Ю.П. Муха, П.В. Поваров / Известия ВолгГТУ. Серия: Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. -2011 №6(79). –вып. С. 69-75.
- 44 Бырин В.Н., Бырин С.Ю. Многоцелевой ультразвуковой течеискатель // Судостроение, 2007, с.43- 46.

- 45 Павелко В.И., Слепов М.Т., Хайретдинов В.У. Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200 // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. – 2016. – №4. – с. 44
- 46 Чернов А.В., Абидова Е.А., Хегай Л.С., Белоус М.А. Методика диагностирования состояния электромеханических приводов систем управления и защиты реакторной установки [Электронный ресурс]: Инженерный вестник Дона №4 2017 – Режим доступа: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4492](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4492)
- 47 Абидова Е.А., Драка О.Е., Соловьев В.И., Хегай Л.С., Пугачева О.Ю., Чернов А.В. Обработка изображений в системе диагностики дизелей-генераторов АЭС с использованием энтропийных подходов. Ядерная физика и инжиниринг.- 2017. - Т. 8, № 2. - С. 181-186.
- 48 Абидова Е.А., Хегай Л.С., Чернов А.В., Пугачёва О.Ю., Соловьёв В.И. Обработка диагностической информации при определении технического состояния дизель-генераторных установок АЭС. Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс] : тез. докл. XIII Междунар. науч.-практ. конф., 31 мая - 2 июня 2017 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск : [Б. и.], 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD).
- 49 Абидова Е.А., Пугачёва О.Ю., Соловьёв В.И., Дембицкий А.Е. Переносной программно-технический комплекс диагностирования дизель-генераторов. Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс] : тез. докл. XIV Междунар. науч.-практ. конф., 30 мая - 1 июня 2018 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск : [Б. и.], 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD).
- 50 Абидова Е.А., Дембицкий А.Е., Пугачёва О.Ю. Комплексный анализ диагностических параметров дизель-генераторных установок атомных электростанций. Безопасность ядерной энергетики: тез. докл. XV науч.-практ. конф., 6–8 июня 2019 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск

- : ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2019. – 1 электрон. опт. диск [CD]. – ISBN 978-5-7262-2569-2.
- 51 Абидова Е.А., Никифоров В.Н., Пугачёва О.Ю., Дембицкий А.Е., Горбунов И.Г., Елжов Ю.Н., Поваров В.П., Крупский А.Г. Методы и средства оперативного контроля состояния дизель-генераторных установок АЭС. 55 лет безопасной эксплуатации АЭС с ВВЭР в России и за рубежом: тез. докл. науч.-практ. конф., 24–27 сентября 2019 г. - г. Нововоронеж.
- 52 Крашенинников С.В. Современные подходы к диагностированию дизельных двигателей внутреннего сгорания. Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. Выпуск № 2 (12) / 2013. С 59-68: DOI: 10.15293/2226-3365 ISSN 2226-3365.
- 53 Пугачева О.Ю., Пугачев А.К., Соловьев В.И., Абидова Е.А. Диагностика дизель-генератора 15Д-100 по показателям вибрации. // Глобальная ядерная безопасность. 2014 № 2(11), С. 91–97: ISSN 2305-414X.
- 54 Desantes J.M., Galindo J., Guardiola C., Dolz V. (2010). Air mass flow estimation in turbocharged diesel engines from in-cylinder pressure measurement. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34: 37-47.
- 55 Dallmann, T.R., Onasch, T.B., Kirchstetter, T.W., Worton, D.R., Fortner, E.C., Herndon, S.C., Wood, E.C., Franklin, J.P., Worsnop, D.R., Goldstein, A.H. and Harley, R.A. (2014). Characterization of particle matter emission from on-road gasoline and diesel vehicles using soot particle aerosol mass spectrometer. *Atmos. Chem. Phys.* 14: 7585–7599.
- 56 Рубан В.Г. Комплексный подход к организации тепловой диагностики узлов локомотивов в условиях депо / В.Г. Рубан, О.А. Ворон // Труды Всероссийской на учно-практической конференции «Транспорт-2011», часть 2. Ростов-на-Дону, 2011.– с. 421-423
- 57 Фитч Дж., Тройер Д. Анализ масел. Основы и применение /Пер. с англ.; под ред. Е.А.Новикова, М.В.Кирюхина. – СПб.: ЦОП "Профессия", 2014. 176 с.

- 58 Guo, Z.G.; Wang, S.R.; Wang, X.Y. Emulsification of Bio-Oil Heavy Fraction with Diesel by Mechanical and Ultrasonic Technologies. *Appl. Mech. Mater.* 2013, 316–317, 1133–1137.
- 59 Тихомиров М.В., Овчинников С.В., Хрящев Ю.Е. Разработка диагностического комплекса для электронной системы управления отечественных автомобильных дизелей. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2015. № 1. - с. 142-148: DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-142-148 ISSN 0236-3941.
- 60 СТО 1.1.1.01.0069-2017. Правила организации технического обслуживания и ремонта систем и оборудования атомных станций.
- 61 ГОСТ Р 27.606-2013/IEC 60300-3-11:2009 (NEQ). Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность.
- 62 СТО 1.1.1.01.007.0281-2010. Управление ресурсными характеристиками элементов энергоблоков атомных станций.
- 63 Положение по управлению ресурсными характеристиками элементов НВ АЭС №40 – АЭС-2014.
- 64 ГОСТ 30848-2003 (ИСО 13380:2002). Диагностирование машин по рабочим характеристикам. Общие положения.
- 65 ГОСТ Р 27.605-2013. Надежность в технике. Ремонтопригодность оборудования. Диагностическая проверка.
- 66 Lei, Y., Z. He, and Y. Zi, A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery. *Expert Systems with Applications*, 2008. 35(4): p. 1593-1600.
- 67 Kim, Y., Rizzoni, G., Samimy, B., Wang, Y. Analysis and processing of Shaft Angular Velocity Signals in Rotating Machinery for Diagnostic Applications // *IEEE International Conference on Acoustic Speech and Signal Processing USA*. – 1995. - 5-2971-0749-8411
- 68 ГОСТ Р 57154-2016 Мониторинг тепломеханического оборудования АЭС. Расчетно-экспериментальный метод. Общие требования.

- 69 Р 50.1.028-2001 Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования.
- 70 ГОСТ 31349-2007 Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Измерение вибрации и оценка вибрационного состояния.
- 71 ГОСТ 53639-2009 Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Приемка. Методы испытаний.
- 72 ГОСТ Р ИСО 17359-2015 Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Протокол испытаний переносного программно-технического комплекса

## ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

«Волгодонская тепловая генерация»

## ПРОТОКОЛ

20.12.2021г.

№ \_\_\_\_\_

Испытание переносного программно-технического комплекса при  
диагностировании дизель-генератора марки ДГМА-48М1  
Волгодонской ТЭЦ-2

Комиссия в составе:

Председатель

ЗГИП – Дзюбак А.В.

комиссии:

Члены комиссии:

Вед.инж. ГОТ, ПБиЭ – Казакевич А.Г.

инженер УЭТО – Дудукалов А.А.

провела испытания мобильного комплекса ППТК в соответствии с методикой.

**1 Цель испытаний**

Конечной целью испытаний является оценка функциональных возможностей и качества выполнения диагностического обследования, реализованного в мобильном комплексе диагностики

К сравнительным испытаниям представлен программно-технический комплекс (ППТК), предназначенный для контроля технического состояния дизель-генераторов, в составе, приведенном в таблице 1.

Таблица 1 – Комплектность ППТК

№ п.п.	Наименование	Количество
1	Защищенный ноутбук Desten CyberBook S395	1 шт.
2	Датчик вибрации трехкомпонентный «VS-3D»	12 шт.
3	Прибор для динамического измерения давления в двигателях внутреннего сгорания ELPI-25	1 шт.
4	Ультразвуковой теченскатель SDT-270	1 шт.
5	Тепловизор Testo 890-2	1 шт.
6	Тележка	1 шт.

Вместе с ППТК к рассмотрению и анализу представлены:

- Эксплуатационная документация, поставляемая в составе ППТК;
- паспорт К.700.13.00.000 ПС;

- формуляр К.700.13.00.000 ФО;
- руководство пользователя К.700.13.00.000 ИЗ;
- руководство по эксплуатации К.700.13.00.000 РЭ;
- методика регистрации и диагностирования К.700.13.00.000 ПГ.

## 2 Перечень пунктов методики, на соответствие которым проведены испытания мобильного комплекса диагностики ППТК

- 2.1 Регистрация диагностических данных.
  - 2.1.1 Регистрация сигналов вибрации.
  - 2.1.2 Тепловизионный контроль.
  - 2.1.3 Регистрация ультразвуковых параметров.
- 2.2 Обработка и анализ диагностических данных.
  - 2.2.1 Обработка сигналов вибрации в соответствии с ГОСТ 31349-2007.
  - 2.2.2 Обработка тепловизионных параметров в соответствии с ГОСТ ИСО 1834-1-2013.
  - 2.2.3 Сравнительный анализ ультразвуковых параметров.
  - 2.2.4 Обработка ультразвуковых сигналов с применением анализа сингулярного спектра и метода главных компонент в соответствии с методикой.

## 3 Результаты диагностирования дизель-генератора Волгодонской ТЭЦ-2

По результатам оценки параметров вибрации (Приложение А) не выявлено отклонений.

По результатам сравнения тепловизионных параметров с нормативными значениями (Приложение Б) не выявлено отклонений.

По результатам сравнения ультразвуковых параметров с результатами предыдущих испытаний (Приложение В) не выявлено отклонений.

По результатам обработки комплекса измеренных сигналов с применением анализа сингулярного спектра и метода главных компонент (Приложение Г) выявлено отклонение в работе топливной группы цилиндра №1. Путем разборной дефектации было подтверждено наличие дефекта «заедание регулирующего рычага топливного».

## 4 Выводы

Испытания ППТК показали, что обработка комплекса измеренных сигналов с применением анализа сингулярного спектра и метода главных компонент, предложенная Абидовой Е.А. и Дембицким А.Е., реализуемая ППТК, обеспечивает выявление дефектов дизель-генератора тех случаях, когда достоверные результаты диагностирования не могут быть получены традиционными методами.

Председатель комиссии:

Дзюбак А.В.

Члены комиссии:

Казакевич А.Г.

Дудукалов А.А.



**ПРИЛОЖЕНИЕ А.**  
**Результаты оценки параметров вибрации**

№	Точка измерения	V, мм/с	Примечания
1	Левый борт остова со свободного конца в районе головок цилиндров	10,8	Соответствует норме
2	Левый борт остова посередине в районе головок цилиндров	8,9	Соответствует норме
3	Левый борт остова со стороны генератора в районе головок цилиндров	8,8	Соответствует норме
4	Левый борт остова со свободного конца в районе опор для крепления	8,3	Соответствует норме
5	Левый борт остова посередине в районе опор для крепления	15,2	Соответствует норме
6	Левый борт остова со стороны генератора в районе опор для крепления	10,7	Соответствует норме
7	Правый борт со свободного конца в районе головок цилиндров	9,9	Соответствует норме
8	Правый борт посередине в районе головок цилиндров	6,8	Соответствует норме
9	Правый борт со стороны генератора в районе головок цилиндров	12,5	Соответствует норме
10	Правый борт со свободного конца в районе опор для крепления	12,6	Соответствует норме
11	Правый борт посередине в районе опор для крепления	13,6	Соответствует норме
12	Правый борт со стороны генератора в районе опор для крепления	12,2	Соответствует норме
13	Подшипник генератора №1 слева	8,2	Соответствует норме
14	Подшипник генератора №2 слева	10,8	Соответствует норме
15	Подшипник генератора №1 справа	8,9	Соответствует норме
16	Подшипник генератора №2 справа	11,4	Соответствует норме
17	Левая сторона фундаментной балки генератора со стороны дизеля	6,3	Соответствует норме
18	Левая сторона фундаментной балки генератора со стороны свободного конца	5,7	Соответствует норме
19	Правая сторона фундаментной балки генератора со стороны дизеля	5,6	Соответствует норме
20	Правая сторона фундаментной балки генератора со стороны свободного конца	6,6	Соответствует норме

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

## Результаты оценки тепловизионных параметров

	Точка измерения	Максимальная	Комментарий
1	Выход масла	62,7	Соответствует норме
2	Выход охлаждающей жидкости	62,2	Соответствует норме
3	Вход охлаждающей жидкости	66,2	Соответствует норме
4	Вход масла	62,2	Соответствует норме
5	Выхлопной патрубок цилиндра №1	138,2	Соответствует норме
6	Выхлопной патрубок цилиндра №2	136,2	Соответствует норме
7	Выхлопной патрубок цилиндра №3	132,8	Соответствует норме
8	Выхлопной патрубок цилиндра №4	132,8	Соответствует норме
9	Выхлопной патрубок цилиндра №5	146,6	Соответствует норме
10	Выхлопной патрубок цилиндра №6	146,1	Соответствует норме
11	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №1	29	Соответствует норме
12	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №2	30	Соответствует норме
13	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №3	28	Соответствует норме
14	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №4	30	Соответствует норме
15	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №5	28	Соответствует норме
16	Трубка высокого давления от ТНВД до форсунки цилиндра №6	29	Соответствует норме
17	Подшипник генератора №2	18	Соответствует норме
18	Корпус генератора (правая сторона)	18	Соответствует норме



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения метода диагностирования Волгодонская тепловая генерация

**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
"Волгодонская тепловая генерация"**

"УТВЕРЖДАЮ"

Главный инженер

ООО "Волгодонская тепловая генерация"



Романенко Е.И.

2019 г.

**А К Т**

о внедрении метода диагностирования механизмов циклического действия  
Абидовой Елены Александровны, Дембицкого Артема Евгеньевича,  
Хегай Лауры Сергеевны

Комиссия в составе:

председатель А.В. Дзюбак - заместитель главного инженера по производству;

члены комиссии:

А.Г. Казакевич – ведущий инженер ГОТ,ПБиЭ;

А.А. Дудукалов– инженер УЭТО,

составили настоящий акт о том, что метод диагностирования механизмов циклического действия на основе энтропийной параметризации диагностических сигналов, разработанный Абидовой Е. А., Дембицким А. Е., Хегай Л. С. использован при диагностике дизель-генераторной установки ООО "Волгодонская тепловая генерация" 15.11.2019.

По результатам диагностирования с участием научного сотрудника ВИТИ НИЯУ МИФИ Абидовой Е.А., зав. лабораторией ВИТИ НИЯУ МИФИ Горбунова И.Г., зав. лабораторией ВИТИ НИЯУ МИФИ Соловьёва В.И., начальника участка филиала концерна АО «Концерн Росэнергоатом»

«Нововоронежская атомная станция» Сысоева Н.П., ведущего инженера филиала концерна АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» Попова А.В., ведущего инженера ГОТ,ПБ и Э ООО «Волгодонская тепловая генерация» Казакевич А.Г., инженера УЭТО Дудукалова А.А., составлены: Протокол анализа ультразвуковых параметров дизель-генераторной установки, Протокол вибрационного обследования дизель-генераторной установки.

Повышение достоверности обнаружения неисправности за счет:

- вычисления энтропийных показателей сигнала вибрации;
- вычисления энтропийных показателей ультразвукового сигнала.

Использование указанных результатов позволяет: повысить глубину и достоверность диагностирования дизель-генераторных установок, выявлять дефекты на ранней стадии развития. Метод диагностирования механизмов циклического действия, разработанный Абидовой Е. А., Дембицким А. Е., Хегай Л. С. может быть применен в условиях энергетических производств, в том числе на АЭС.

**Председатель комиссии:**

Заместитель главного инженера  
по производству

  
\_\_\_\_\_ А.В. Дзюбак

**Члены комиссии:**

Ведущий инженер ГОТ,ПБиЭ

  
\_\_\_\_\_ А.Г.Казакевич

Инженер УЭТО

  
\_\_\_\_\_ А.А. Дудукалов

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

## Акт внедрения метода диагностирования Нововоронежская АЭС



Акционерное общество  
«Российский концерн по производству электрической  
и тепловой энергии на атомных станциях»

**(АО «Концерн Росэнергоатом»)**

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом»  
«Нововоронежская атомная станция»

**(Нововоронежская АЭС)**

УТВЕРЖДАЮ



С.Л. Витковский

2019

## А К Т

о внедрении метода диагностирования электроприводного оборудования  
**Абидовой Елены Александровны, Бабенко Романа Геннадьевича,  
Дембицкого Артема Евгеньевича, Лапкиса Александра Аркадьевича**

Комиссия в составе:

председатель

М.Т. Слепов – начальник отдела технической диагностики, канд. техн. наук;

члены комиссии:

В.С. Диденко - начальник ТЦ-5;

Н.П. Сысоев - начальник участка ОТД,

составили настоящий акт о том, что метод диагностирования электроприводного оборудования на основе энтропийной параметризации диагностических сигналов, использован при диагностике электроприводной арматуры Нововоронежской атомной электростанции в период планово-предупредительного ремонта 2017 года (договор №4/АЭМ-17 от 17.07.2017 г. на

оказание услуг по теме «Оценка технического состояния электроприводной арматуры энергоблока № 5 Нововоронежской АЭС»). Были рассчитаны показатели энтропии Шеннона сигналов тока электроприводной арматуры. Повышение достоверности диагностирования было достигнуто за счет количественной оценки хаотических особенностей анализируемых сигналов. Результаты внедрения метода представлены в отчете «Оценка технического состояния электроприводной арматуры энергоблока №5 Нововоронежской АЭС» ЭМТД 66-128-2017Д.

Использование указанных результатов позволяет: повысить глубину и достоверность диагностирования электроприводной арматуры на АЭС, выявлять отклонения в настройке оборудования.

**Председатель комиссии:**

Начальник отдела технической диагностики,  
канд. техн. наук


 М.Т. Слепов

**Члены комиссии:**

Начальник ТЦ-5

 В.С. Диденко

начальник участка ОТД

 Н.П. Сысоев



## ПРИЛОЖЕНИЕ К АКТУ

### о внедрении метода диагностирования электроприводного оборудования Абидовой Елены Александровны, Бабенко Романа Геннадьевича, Дембицкого Артема Евгеньевича, Лапкиса Александра Аркадьевича

Метод был опробован в период планово-предупредительного ремонта 2017 года (договор №4/АЭМ-17 от 17.07.2017 г. на оказание услуг по теме «Оценка технического состояния электроприводной арматуры энергоблока № 5 Нововоронежской АЭС»). Был проведен углубленный анализ технического состояния электроприводной арматуры тех. позиций 14ВЦ-50, 13КГП-30, ППР-21 и ВД-30 при выполнении операции «открытие» или «закрытие» по результатам диагностирования в период ППР-2017 в сравнении с предыдущими измерениями (отчет «Оценка технического состояния электроприводной арматуры энергоблока №5 Нововоронежской АЭС» ЭМТД 66-128-2017Д).

С целью количественной оценки хаотических особенностей сигналов тока арматуры указанных тех. позиций были рассчитаны показатели энтропии Шеннона (см. Таблица). Рост энтропии соответствует росту хаотической составляющей в сигнале, т.е. ухудшению состояния.

Ухудшение состояния тех. поз. 14ВЦ-50 отразилось на показателях энтропии Шеннона - выросла на 36%. Полученные результаты хорошо согласуются с анализом огибающих токового сигнала арматуры. Ухудшение связано с отклонениями в работе запорного органа. Улучшение состояние тех. поз. 13КГП-30 выражается в снижении энтропии Шеннона на 9%. Улучшение в работе ходового узла подтверждается результатами анализа огибающих и спектров, что связано со снижением биения выходного вала ЭП. Об ухудшении состояния арматуры тех. поз. ППР-21 свидетельствуют увеличение энтропии Шеннона на 7%. Результаты коррелируют с данными анализа огибающих и спектров токового сигнала арматуры (рост сопротивления движению в средней части рабочего хода).

Частично работоспособное состояние тех. поз. ВД-30 при открытии и закрытии видно по максимальным значениям энтропии Шеннона. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами анализа огибающих и спектров токового сигнала (наблюдающийся всплеск в средней части огибающей во время хода на открытие возможно свидетельствует о наличии дефекта по ходу движения рабочего органа).

Таблица. Результаты энтропийной параметризации

№	тех. поз.	Энтропия Шеннона		Диагноз
		предыд. знач.	знач. 2017	
1	14ВЦ-50	7,3	9,9	Подклинивание запорного органа в верхнем положении (дефект развивается, состояние работоспособное)
2	13КГП-30	9,7	8,8	Отклонения в работе ходового узла (дефект устранен, состояние работоспособное)
3	ППР-21	8,9	9,6	Затирание штока в зоне сальникового уплотнения (дефект развивается, состояние работоспособное)
4	ВД-30	10,8	11,2	Дефект по ходу движения рабочего органа (дефект развивается, состояние частично работоспособное)

Таким образом, повышение достоверности диагностирования было достигнуто за счет количественной оценки хаотических особенностей анализируемых сигналов. Использование указанных результатов позволяет: повысить глубину и достоверность диагностирования электроприводной арматуры на АЭС, выявлять отклонения в настройке оборудования.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

## Свидетельства о поверке измерительных каналов

 ООО Производственно-внедренческая фирма «Вибро-Центр»  
(ООО ПВФ «Вибро-Центр»)  
Регистрационный номер аттестата аккредитации RA.RU.311739

**СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ**  
**№ 6684/19**

Действительно до « 05 » сентября 20 21 г.

Средство измерений Датчик беспроводной  
наименование, тип, модификация, регистрационный номер в  
трехкоординатный "VS-3D", 68946-17  
Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений

Отсутствует  
серия и номер знака предыдущей поверки

заводской номер 31

поверено в соответствии с 4277-093-12025123-2017 МП

с применением эталона 3.2.ВЛК.0001.2014 (см. подробнее [www.gos-etalon.ru](http://www.gos-etalon.ru))

при следующих значениях влияющих факторов:  
температура 22 °C; влажность 45 %; давление - мм рт. ст.  
и на основании результатов первичной (периодической) поверки  
признано соответствующим установленным в описании типа  
метрологическим требованиям и пригодным к применению в сфере  
государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Знак поверки 

Главный метролог Ушаков Алексей Николаевич  
Должность руководителя подразделения Подпись Инициалы, фамилия

Поверитель Кобелев Андрей Викторович  
Подпись Инициалы, фамилия

Дата поверки « 06 » сентября 20 19 г.



Поверено в соответствии с описанием типа в трех ортого-  
нальных плоскостях.

измерений (если предусмотрено методикой поверки)

"А" (пик) от 1 до 50 м/с<sup>2</sup> от 10 до 1000 Гц

"V" (СКЗ) от 1 до 80 мм/с от 10 до 1000 Гц

Знак поверки



Поверитель

Подпись

Кобелев Андрей Викторович

Инициалы, фамилия

Дата поверки « 06 » сентября 20 19 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,  
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ»  
(ФБУ «РОСТЕСТ - МОСКВА»)



АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ № RA.RU.311341  
Регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311341

## СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

№ СП 2722143

Действительно до «26» августа 2020 г.

Средство измерений Тепловизор инфракрасный Testo 890-2, Госреестр

наименование, тип, модификация средства измерений, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа

№ 62132-15

заводской (серийный) номер 03160954

в составе -

номер знака предыдущей поверки -

поверено в полном объеме

наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений

в соответствии с РТ-МП-2242-2015

наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: 3.1.ZMA.0099.2013, 3.1.ZMA.0178.2013,

регистрационный номер и (или) наименование, тип, заводской номер,

3.1.ZMA.0182.2013, 3.1.ZMA.0106.2013

разряд, класс или погрешность эталонов, применяемых при поверке

при следующих значениях влияющих факторов:

T = 20,6 °C, отн. вл. 63,9 %,   
перечень влияющих факторов,

P = 100,2 кПа

нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений

и на основании результатов первичной (периодической) поверки признано пригодным к применению.

Знак поверки:

Начальник лаборатории № 442

должность руководителя подразделения или другого уполномоченного лица

Поверитель

Дата поверки «27» августа 2019 г.

Подпись

Подпись

Горбунов Руслан

фамилия, имя и отчество (при наличии)  
Александрович

Пашовкин Михаил

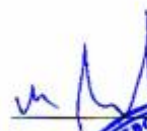
фамилия, имя и отчество (при наличии)  
Геннадьевич



**NANO OPTOTECH**[www.nanooptotech.ru](http://www.nanooptotech.ru)199034, г. Санкт-Петербург,  
Биржевая линия, д. 16Исх. № 3 от 04.09 2019 г.

Настоящим ООО «НаноОптоТех» подтверждает, что прибор для динамического измерения давления в двигателях внутреннего сгорания модели **ELPI-25**, произведенный фирмой Akrit Engineering, серийный номер **17101381/394682**, поставленный по договору № **25-11/72-18** от 07.02.2018, успешно прошел процедуру доработки (upgrade) и повторной калибровки, произведенной 23 августа 2019 г. Сертификат о Калибровке от фирмы-производителя прилагается. Рекомендуемая дата очередной калибровки – **23 августа 2021 г.**

Генеральный директор ООО «НаноОптоТех»



Гужва М.Е.





**Akrit  
Engineering**

Amherst, Harnham Lane  
Withington  
GL54 4DD, UK

Fax : + 44 (0) 8703167797  
Email: info@akritengineering.com  
Web site: www.akritengineering.com

### ***Calibration certificate of the Pressure Indicator***

**Type EPLI (250 bar)**

**Serial No. 17101381/394682**

Date: 08/23/2019

Test Pressure Gauge		Pressure Indicator	Deviation Linearity, % FS
Keller	LEO1		
Serial No.	49562		
Class	0.10%		
0.0 bar		0.0 bar	< 1
50.0 bar		49.3 bar	< 1
100.0 bar		99.1 bar	< 1
150.0 bar		148.6 bar	< 1
200.0 bar		198.6 bar	< 1
250.0 bar		249.8 bar	< 1

#### **Confirmation**

The equipment mentioned above and the identified by Serial Number complies with the agreement of the order and meets the manufacturing tolerances specified in the data sheet.

All ELPI pressure sensors are recommended to be recalibrated every 2 years.

The document is valid without signature. No copies allowed without the permission of Akrit Engineering.



**Akrit  
Engineering**

Amherst, Harnham Lane  
Withington  
GL54 4DD, UK

Fax : + 44 (0) 8703167797  
Email: info@akritengineering.com  
Web site: www.akritengineering.com

## CALIBRATION REPORT

No. 57013

**Device:** SDT270MK2 RECEIVER No. 280170343

**Calibration result:**

Procedure ref: IT.R270.PC.001

Generator dB $\mu$ V	Ampli SDT270MK2 dB $\mu$ V	Reading values SDT270MK2 dB $\mu$ V *		Limit values dB $\mu$ V	
		Before intervention	After intervention	Min.	Max.
20	80	20.0	20.0	19.5	20.5
30	70	29.9	29.9	29.5	30.5
40	60	39.9	39.9	39.5	40.5
50	50	50.0	50.0	49.5	50.5
60	40	60.0	60.0	59.5	60.5
70	30	70.0	70.0	69.5	70.5
80	20	80.0	80.0	79.5	80.5
90	10	90.0	90.0	89.5	90.5

\* measurement uncertainty +/- 1 dB

**Functional test result:**

Tested item	Result	Tested item *	Result
Black Lemo connector	OK	Power supply plug	OK
Red Lemo connector	OK	Headset plug	OK
USB Connection	OK	Backlight	OK
		Keyboard	OK
		Internal sensor	OK
		Temperature measurement	-
		RPM measurement	-

\* manually tested by operator

**Condition of test:**

Frequency	Ambient temperature	Relative humidity
39.6 KHz	23 $\pm$ 5 $^{\circ}$ C	0 - 80%

**Conclusion:**

Corresponding to the maximum allowed deviations: YES

Generated on: 2019-10-04 by: Pavel Smirnov

**Checking and calibration reference instruments:**

Sinutest SDT No. 109130015

Calibrated on 2019-09-20. Due date 2020-09-20

Multimeter Keithley Type 2000 No. 1268135

Calibrated on 2019-02-28. Due date 2020-02-28




**Ultrasound Solutions**

# CALIBRATION CERTIFICATE CERTIFICAT DE CALIBRAGE CALIBRATIECERTIFICAAT

**No. 57013**

**Delivered by:** Diagnost  
**Délivré par:** Okruzhnoy proezd 15-2  
**Geleverd door:** 105187 MOSCOW  
 Russian Federation  
 Tel.: [7] 495 783 39 64  
 E-mail:

Concerned Equipment Équipement concerné Uitrusting	Serial No. N° série Serienummer	Calibration procedure Procédure de calibrage Calibratieprocedure
<b>SDT270MK2 RECEIVER</b>	<b>280170343</b>	<b>IT.R270.PC.001</b>

The company SDT International certifies that the above-mentioned equipment has been calibrated following the SDT indicated procedure.

La société SDT International certifie que l'équipement mentionné ci-dessus a été calibré selon la procédure SDT indiquée.

De firma SDT International garandeert dat de hierboven vermelde uitrusting volgens de beschreven SDT-procedure werd gecalibreerd.

The accuracy and calibration of this instrument are traceable through reference standards that are compared, at planned intervals, to national or international standards.

La traçabilité du calibrage de cet équipement est assurée par des appareils de référence qui sont comparés, à intervalles programmés, à des étalons nationaux ou internationaux.

De calibratieopvolging van deze uitrusting wordt verzekerd door referentieapparaten die op vastgestelde intervallen worden vergeleken met nationale of internationale ijkwaarden.

SDT International is a ISO9001-2015 certified company by Lloyd's Register (certificate no. 10059899).

La société SDT International est certifiée ISO9001-2015 par Lloyd's Register (certificat n° 10059899).

De firma SDT International is ISO9001-2015 gecertificeerd door Lloyd's Register (certificaatnr. 10059899).

**Operator:** Pavel Smirnov

**Date issued:** 2019-10-04



## RECOMMENDED CALIBRATION INTERVALS

No. 57013

Extract of **DC.QUAL.005—05**

The text regarding “recommended calibration intervals” is available in English, Dutch, French, German, Italian and Spanish.

The following is the English version:

SDT recommends annual recalibration of SDT instruments and annual verification of sensors to benefit from its **limited lifetime warranty**.

This periodicity is coherent with the observed long-term stability of SDT electronic equipment's.

However:

- For new equipment leaving the factory the initial period is extended to 15 months instead of 12 (to avoid any possible discrimination between users due to transportation time, customs clearance, etc.)
- SDT recognizes that each customer may have their own Quality Assurance Standards and internal requirements. If a customer has established a Quality Assurance Program that includes a documented procedure for measurement deviations, and if an instrument and the relevant sensor show acceptable deviations and do not show signs of physical damage, then calibration periodicity could be extended to two years.
- Third party organizations having more authority (Class, or State Administrations) may have defined their own regulations for example 6 months, or 2 years calibration interval: by evidence, local legally applicable regulations supersede SDT rules.

For these reasons, SDT Calibration Certificates do no more mention a “calibration due date”, but simply the “last calibration date”.

For user convenience, the date of the last calibration of an SDT200, SDT270 or SDT LUBExpert instruments can also be found in the menu screens.

***Note! Only the users of SDT200, SDT270, SDT LUBExpert, SDT340, SDT Checkers range, SDT T-Sonic1 and SDT T-Sonic9 can benefit from limited lifetime warranty.***



## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Результаты диагностики дизель-генераторных установок НВАЭС

Таблица Д.1 – Результаты вибромониторинга установки 15Д-100

№	Точка измерения		СКЗ		
	Название	Комментарий	s, мкм	V, мм/с	a, м/с <sup>2</sup>
1	VDXL01	левая сторона остова сверху со стороны генератора	10,7	5,0	6,1
2	VDXL02	левая сторона остова сверху посередине	50,4	5,6	13,4
3	VDXL03	левая сторона остова сверху со стороны ГТН	13,4	4,3	5,8
4	VDXL04	левая сторона остова снизу со стороны генератора	8,2	4,6	9,9
5	VDXL05	левая сторона остова снизу посередине	38,2	5,7	7,9
6	VDXL06	левая сторона остова снизу со стороны ГТН	14,5	4,4	8,5
7	VDXR01	правая сторона остова сверху со стороны генератора	11,4	4,3	18,7
8	VDXR02	правая сторона остова сверху посередине	43,3	6,3	22,0
9	VDXR03	правая сторона остова сверху со стороны ГТН	10,7	4,1	6,4
10	VDXR04	правая сторона остова снизу со стороны генератора	11,1	4,3	17,5
11	VDXR05	правая сторона остова снизу посередине	55,3	6,6	9,6
12	VDXR06	правая сторона остова снизу со стороны ГТН	9,5	4,1	9,5
13	VGEX04	корпус возбудителя сверху со стороны генератора	16,9	3,5	1,2
14	VGHX01	корпус генератора осевой со стороны выносного подшипника	22,9	4,2	1,8
15	VGXL05	левая сторона корпуса генератора на уровне вала посередине	5,5	2,0	6,0
16	VGXR05	правая сторона корпуса генератора на уровне вала посередине	5,7	1,4	6,6
17	VGXX01	корпус генератора сверху со стороны выносного подшипника	3,5	2,6	5,4

Таблица Д.2 Результаты мониторинга ультразвуковых параметров ДГУ 15Д-100

№	Точка измерения		Измерения		
	Название	Комментарий	СКЗ, дБмкВ	Пик СКЗ, дБмкВ	Пик- фактор
1	UAGXR	корпус генератора правая сторона	25,4	25,9	6,5
2	UAPX	масляный насос	32,0	33,8	6,2
3	UATL01	турбокомпрессор левый	29,1	29,5	4,2
4	UATL02	турбокомпрессор левый	19,5	20,1	3,8
5	UATR01	турбокомпрессор правый	24,8	25,4	3,2
6	UATR02	турбокомпрессор правый	23,4	23,8	3,5
7	UDCL10	левая сторона цилиндр №10	68,2	69,2	12,0
8	UDCR01	правая сторона цилиндр №1	65,8	67,3	11,9
9	UDCR02	правая сторона цилиндр №2	63,6	65,6	10,2
10	UDCR03	правая сторона цилиндр №3	65,3	66,5	11,6
11	UDCR04	правая сторона цилиндр №4	59,5	60,7	10,1
12	UDCR05	правая сторона цилиндр №5	65,7	66,9	13,2
13	UDCR06	правая сторона цилиндр №6	63,6	64,7	13,6
14	UDCR07	правая сторона цилиндр №7	64,8	66,0	10,8
15	UDCR08	правая сторона цилиндр №8	63,8	64,4	9,5
16	UDCR09	правая сторона цилиндр №9	66,2	66,8	13,2
17	UDCR10	правая сторона цилиндр №10	65,8	66,7	12,6
18	UDLL01	остов дизеля в районе НКВ со стороны навесного оборудования	51,4	52,1	13,3
19	UDLL02	остов дизеля в районе НКВ в центре	38,7	39,7	12,3
20	UDLL03	остов дизеля в районе НКВ со стороны генератора	46,0	46,5	6,0
21	UDNL01	левая сторона форсунка № 1	63,4	65,6	15,1
22	UDNL02	левая сторона форсунка №2	69,3	70,3	12,0
23	UDNL03	левая сторона форсунка №3	69,9	70,9	10,2
24	UDNL04	левая сторона форсунка №4	69,9	70,6	10,0
25	UDNL05	левая сторона форсунка №5	62,5	65,0	15,0
26	UDNL06	левая сторона форсунка №6	67,5	68,9	6,9
27	UDNL07	левая сторона форсунка №7	67,9	68,9	14,8
28	UDNL08	левая сторона форсунка №8	62,3	63,6	20,2
29	UDNL09	левая сторона форсунка №9	67,1	69,1	14,1

№	Точка измерения		Измерения		
	Название	Комментарий	СКЗ, дБмкВ	Пик СКЗ, дБмкВ	Пик- фактор
30	UDNL10	левая сторона форсунка №10	64,4	65,5	19,1
31	UDNR01	правая сторона форсунка №1	69,1	70,6	13,0
32	UDNR02	правая сторона форсунка №2	67,4	68,0	10,2
33	UDNR03	правая сторона форсунка №3	71,7	72,3	9,0
34	UDNR04	правая сторона форсунка №4	70,7	71,7	9,3
35	UDNR05	правая сторона форсунка №5	71,5	72,9	9,0
36	UDNR06	правая сторона форсунка №6	68,7	69,6	10,6
37	UDNR07	правая сторона форсунка №7	61,4	62,7	10,4
38	UDNR08	правая сторона форсунка №8	69,2	71,4	9,4
39	UDNR09	правая сторона форсунка №9	66,2	67,0	14,5
40	UDNR10	правая сторона форсунка №10	68,2	69,2	12,0
41	UDPL01	левая сторона ТНВД №1	51,5	52,7	14,1
42	UDPL02	левая сторона ТНВД №2	69,3	70,3	12,0
43	UDPL03	левая сторона ТНВД №3	64,7	66,7	14,5
44	UDPL04	левая сторона ТНВД №4	64,0	65,0	15,5
45	UDPL05	левая сторона ТНВД №5	64,6	65,6	13,6
46	UDPL06	левая сторона ТНВД №6	64,3	64,9	16,4
47	UDPL07	левая сторона ТНВД №7	66,3	66,7	15,1
48	UDPL08	левая сторона ТНВД №8	64,6	66,4	11,5
49	UDPL09	левая сторона ТНВД №9	65,6	66,9	9,7
50	UDPL10	левая сторона ТНВД №10	63,4	64,9	13,0
51	UDPR01	правая сторона ТНВД №1	64,9	65,8	16,6
52	UDPR02	правая сторона ТНВД №2	65,4	66,6	15,8
53	UDPR03	правая сторона ТНВД №3	63,7	65,6	17,0
54	UDPR04	правая сторона ТНВД №4	65,0	67,0	15,3
55	UDPR05	правая сторона ТНВД №5	65,3	67,3	13,5
56	UDPR06	правая сторона ТНВД №6	65,1	66,5	15,1
57	UDPR07	правая сторона ТНВД №7	60,6	62,0	11,0
58	UDPR08	правая сторона ТНВД №8	63,7	65,2	19,5
59	UDPR09	правая сторона ТНВД №9	60,6	62,4	11,0

№	Точка измерения		Измерения		
	Название	Комментарий	СКЗ, дБмкВ	Пик СКЗ, дБмкВ	Пик- фактор
60	UDPR10	правая сторона ТНВД №10	58,7	60,5	19,3
61	UDUL01	остов дизеля в районе ВКВ со стороны навесного оборудования	44,2	44,8	6,7
62	UDUL02	остов дизеля в районе ВКВ в центре	44,5	45,6	8,8
63	UDUL03	остов дизеля в районе ВКВ со стороны генератора	65,8	66,7	12,6
64	UGHX	подшипник генератора	31,5	32,2	5,3
65	UGXL	корпус генератора левая сторона	25,5	25,8	4,2

Таблица Д.3 – Результаты мониторинга температурных параметров ДГУ 15Д-100

№	Точка измерения		Измер. температура, °С	
	Название	Комментарий	Минимальная	Максимальная
1	TAPX01	водяной насос охлаждения дизеля	26,6	48,5
2	TAPX03	масляный насос	25,8	55,3
3	TATL	выхлопной патрубок левый перед ГТН	10,3	139,1 (превышение нормы)
4	TATR	выхлопной патрубок правый перед ГТН	15,3	139,2 (превышение нормы)
5	TDCL01	левая сторона окно № 1	28,9	205,8
6	TDCL02	левая сторона окно № 2	31,1	223,1
7	TDCL03	левая сторона окно № 3	30,4	211,4
8	TDCL04	левая сторона окно № 4	32,7	184,3
9	TDCL05	левая сторона окно № 5	28,7	197,1
10	TDCL06	левая сторона окно № 6	29,0	231,4
11	TDCL07	левая сторона окно № 7	28,7	223,5
12	TDCL08	левая сторона окно № 8	29,4	225,9
13	TDCL09	левая сторона окно № 9	29,4	247,9
14	TDCL10	левая сторона окно № 10	26,5	236,1
15	TDCR01	правая сторона окно № 1	23,1	84,2
16	TDCR02	правая сторона окно № 2	28,0	80,6
17	TDCR03	правая сторона окно № 3	29,7	89,0

№	Точка измерения		Измер. температура, °С	
	Название	Комментарий	Минимальная	Максимальная
18	TDCR04	правая сторона окно № 4	32,6	93,2
19	TDCR05	правая сторона окно № 5	30,9	77,1
20	TDCR06	правая сторона окно № 6	34,2	82,8
21	TDCR07	правая сторона окно № 7	29,2	88,0
22	TDCR08	правая сторона окно № 8	28,4	85,9
23	TDCR09	правая сторона окно № 9	32,6	89,3
24	TDCR10	правая сторона окно № 10	27,4	91,2
25	TDXL01	левая сторона остова дизеля верх со стороны ГТН	13,2	48,9
26	TDXL02	левая сторона остова дизеля верх	13,2	49,4
27	TDXL03	левая сторона остова дизеля верх со стороны генератора	13,2	46,1
28	TDXL04	левая сторона остова дизеля низ со стороны ГТН	23,6	58,1
29	TDXL05	левая сторона остова дизеля низ	30,8	59,5
30	TDXL06	левая сторона остова дизеля низ со стороны генератора	23,4	47,9
31	TDXR01	правая сторона остова дизеля верх со стороны со стороны генератора	22,8	56,7
32	TDXR02	правая сторона остова дизеля верх	22,8	57,2
33	TDXR03	правая сторона остова дизеля верх со стороны ГТН	22,8	57,0
34	TDXR04	правая сторона остова дизеля низ со стороны генератора	36,3	61,6
35	TDXR05	правая сторона остова дизеля низ	39,2	62,3
36	TDXR06	правая сторона остова дизеля низ со стороны ГТН	28,4	63,4

№	Точка измерения		Измер. температура, °С	
	Название	Комментарий	Минимальная	Максимальная
37	TGEX	возбудитель генератора	17,0	30,5
38	TGHX	подшипник генератора	17,2	23,4
39	TGXL01	корпус генератора левая сторона со стороны дизеля	12,0	24,5
40	TGXL02	корпус генератора левая сторона	12,0	23,3
41	TGXL03	корпус генератора левая сторона со стороны выносного подшипника	12,0	24,0
42	TGXR01	корпус генератора правая сторона со стороны выносного подшипника	12,7	26,7
43	TGXR02	корпус генератора правая сторона	12,7	28,7
44	TGXR03	корпус генератора правая сторона со стороны дизеля	12,7	20,8

Таблица Д.4 – Результат измерения динамического давления 15Д-100

№	Точка измерения		Pz	Pc	Pc'	Pexp	Pi	$\lambda$	fc'	fz	v_max	v_cp	Ni
	Название	Комментарий											
1	IDXX02	давление в цилиндре № 2	78,9	63,2	55,7	26,1	3,5	1,4	-12,2	-1,9	3,9	2,2	37,2
2	IDXX03	давление в цилиндре № 3	78,0	62,8	54,2	22,8	2,1	1,4	-13,6	-4,4	4,5	2,4	22,1
3	IDXX04	давление в цилиндре № 4	60,7	61,0	60,8	37,1	20,3	1,0	-0,3	0,1	3,4	0,0	218,0
4	IDXX05	давление в цилиндре № 5	31,8	31,8	31,8	22,5	13,4	1,0	0,0	0,0	1,8	0,0	143,4
5	IDXX08	давление в цилиндре № 8	51,4	50,6	49,7	33,4	19,1	1,0	-1,4	-0,3	2,3	0,1	204,5
6	IDXX09	давление в цилиндре № 9	41,0	39,4	38,3	21,7	12,6	1,1	-1,8	0,0	2,6	0,2	134,7

где: Pz - максимальное давление, бар;

Pc - давление конца сжатия, бар;

Pc' - давление начала сгорания, бар;

Pexp - давление на стадии расширения (при 36°), бар;

$P_i$  - среднее индикаторное давление, бар;

$\lambda$  - степень повышения давления;

$f_{c'}$  - угол начала сгорания топлива, °;

$f_z$  - угол при максимальном давлении, °;

$v_{\max}$  - максимальная скорость нарастания давления при сгорании, бар/°;

$v_{\text{ср}}$  - средняя скорость нарастания давления при сгорании, бар/°;

$N_i$  - средняя индикаторная мощность.

Таблица Д.5 - Результат измерения вибрации

№	Точка измерения		СКЗ		
	Название	Комментарий	s, мкм	V, мм/с	a, м/с <sup>2</sup>
1	VDXL01	левый борт остова сверху со стороны ГТН	27,1	3,1	4,4
2	VDXL02	левый борт остова сверху посередине	59,0	5,3	5,4
3	VDXL03	левый борт остова сверху со стороны генератора в районе РЧО	45,9	4,8	6,5
4	VDXL04	левый борт остова снизу со стороны ГТН	27,2	4,0	4,8
5	VDXL05	левый борт остова снизу посередине	33,1	4,8	7,4
6	VDXL06	левый борт остова снизу со стороны генератора	85,4	7,7	10,7
7	VDXR01	правый борт остова сверху со стороны ГТН (рядом с ТНВД)	117,1	10,4	7,3
8	VDXR02	правый борт остова сверху посередине	126,8	9,9	5,7
9	VDXR03	правый борт остова сверху со стороны генератора в районе предельного выключателя	110,3	11,9	4,1
10	VDXR04	правый борт остова снизу со стороны ГТН (на станине)	22,9	2,9	3,1
11	VDXR05	правый борт остова снизу посередине	34,2	5,3	6,4
12	VDXR06	правый борт остова снизу со стороны генератора	122,3	11,7	7,0
13	VGHL	подшипник генератора	4,0	2,0	3,9
14	VGHR	подшипник генератора	9,0	1,9	1,3

Таблица Д.6 - Результат измерения ультразвуковых параметров



№	Точка измерения		Измерения		
	Название	Комментарий	СКЗ, дБмкВ	Пик СКЗ, дБмкВ	Пик- фактор
1	12_2	левый борт поперечн. анк.связь №6	37,1	39,1	7,6
2	13_2	левый борт поперечн. анк.связь №6	39,0	41,1	8,0
3	23_1	подшипник генератора справа вертикально	1,4	3,4	11,1
4	UDCL01	левый борт торец цилиндра №1	27,9	28,4	4,3
5	UDCL02	левый борт торец цилиндра №2	56,1	58,2	14,5
6	UDCL03	левый борт торец цилиндра №3	52,9	54,1	13,6
7	UDCL04	левый борт торец цилиндра №4	53,5	55,1	13,8
8	UDCL05	левый борт торец цилиндра №5	56,8	58,6	15,7
9	UDCL06	левый борт торец цилиндра №6	52,9	55,2	19,5
10	UDCR01	правый борт торец цилиндра №1 (возле скобы)	48,8	50,1	8,9
11	UDCR02	правый борт торец цилиндра №2	48,9	49,6	10,5
12	UDCR03	правый борт торец цилиндра №3	50,1	51,8	9,2
13	UDCR04	правый борт торец цилиндра №4	51,7	53,1	7,9
14	UDCR05	правый борт торец цилиндра №5	48,1	49,8	9,3
15	UDCR06	правый борт торец цилиндра №6	47,3	48,4	13,0

Таблица Д.7 – Результат измерения температуры

№	Точка измерения		Измер. температура, °С	
	Название	Комментарий	Минимальная	Максимальная
1	TAPX01	водяной насос внутреннего контура	18,9	54,3
2	TAPX02	водяной насос охлаждения промежуточного контура	16,5	42,3
3	TAPX03	масляный насос	18,3	41,3
4	TDCL01	левый борт выпускной патрубок цилиндра №1	31,2	55,2
5	TDCL02	левый борт выпускной патрубок цилиндра №2	21,7	303,1
6	TDCL03	левый борт выпускной патрубок цилиндра №3	26,5	214,0

№	Точка измерения		Измер. температура, °С	
	Название	Комментарий	Минимальная	Максимальная
7	TDCL04	левый борт выпускной патрубок цилиндра №4	25,5	248,5
8	TDCL05	левый борт выпускной патрубок цилиндра №5	25,2	315,8
9	TDCL06	левый борт выпускной патрубок цилиндра №6	28,2	259,4
10	TDCR01	правый борт выпускной патрубок цилиндра №1	28,5	193,2
11	TDCR02	правый борт выпускной патрубок цилиндра №2	28,0	223,9
12	TDCR03	правый борт выпускной патрубок цилиндра №3	31,3	254,1
13	TDCR04	правый борт выпускной патрубок цилиндра №4	30,2	213,9
14	TDCR05	правый борт выпускной патрубок цилиндра №5	29,2	234,0
15	TDCR06	правый борт выпускной патрубок цилиндра №6	30,5	251,8
16	TDXL01	левый борт смотровой люк №1	31,2	55,2
17	TDXL02	левый борт смотровой люк №2	30,8	55,7
18	TDXL03	левый борт смотровой люк №3	33,7	56,3
19	TDXL04	левый борт смотровой люк №4	31,5	55,6
20	TDXL05	левый борт смотровой люк №5	35,9	56,6
21	TDXL06	левый борт смотровой люк №6	30,6	56,1
22	TDXR01	правый борт смотровой люк №1	33,6	56,5
23	TDXR02	правый борт смотровой люк №2	29,7	58,6
24	TDXR03	правый борт смотровой люк №3	34,5	58,5
25	TDXR04	правый борт смотровой люк №4	32,5	58,4

№	Точка измерения		Измер. температура, °С	
	Название	Комментарий	Минимальная	Максимальная
26	TDXR05	правый борт смотровой люк №5	34,7	58,5
27	TDXR06	правый борт смотровой люк №6	28,9	58,3
28	TGMX	щеточный механизм генератора	20,8	50,5

Таблица Д.8 – Результат измерения динамического давления

№	Точка измерения		Pz	Pc	Pc'	Pexp	Pi	$\lambda$	fc'	fz	$v_{max}$	$v_{cp}$	Ni
	Название	Комментарий											
1	IDXL1	давление в цилиндре № 1лев	47,5	45,5	45,4	18,4	0,5	1,0	-0,0	2,3	1,4	0,1	14,3
2	IDXL2	давление в цилиндре № 2лев	65,6	46,1	45,4	35,1	4,7	1,4	-3,9	11,1	5,5	2,3	138,8
3	IDXL3	давление в цилиндре № 3лев	62,7	44,4	44,1	28,1	3,2	1,4	-2,3	6,2	5,3	2,2	94,6
4	IDXL4	давление в цилиндре № 4лев	63,8	45,3	45,0	30,7	3,6	1,4	-1,9	6,2	5,5	2,3	107,3
5	IDXL5	давление в цилиндре № 5лев	64,4	43,8	43,3	32,4	4,1	1,5	-2,9	7,4	5,2	2,1	121,7
6	IDXL6	давление в цилиндре № 6лев	68,3	49,8	49,2	34,9	3,9	1,4	-2,1	6,9	5,5	2,1	115,7
7	IDXR1	давление в цилиндре № 1прав	64,0	44,6	44,5	35,3	4,3	1,4	0,9	9,9	5,8	2,3	126,7
8	IDXR2	давление в цилиндре № 2прав	63,4	45,2	45,0	32,4	3,8	1,4	-0,9	7,7	5,3	2,2	112,4
9	IDXR3	давление в цилиндре № 3прав	69,4	48,7	48,1	36,1	4,5	1,4	-3,3	6,4	5,7	2,2	133,1
10	IDXR4	давление в цилиндре № 4прав	66,9	50,0	49,5	35,1	3,7	1,4	-1,9	6,8	5,0	1,8	109,4

№	Точка измерения		Pz	Pc	Pc'	Pexp	Pi	$\lambda$	fc'	fz	$v_{\text{max}}$	$v_{\text{cp}}$	Ni
	Название	Комментарий											
11	IDXR5	давление в цилиндре № 5прав	67,0	44,8	44,5	39,7	5,1	1,5	-0,1	10,8	5,8	2,2	152,1
12	IDXR6	давление в цилиндре № 6прав	62,8	46,4	45,7	34,8	4,1	1,4	-3,0	6,8	4,5	1,7	121,1

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Таблица Е.1 – Технические характеристики защищенного ноутбука

Наименование	Значение
Процессор	Intel Pentium 3805U
Дисплей	15,6" Full HD (1920x1080)
Оперативная память	16 Гб DDR3L
Жесткий диск	2.5" SATA SSD, объем 512 Гб
Оптический привод	DVD±RW
Графический адаптер	Интегрированный Intel HD graphics
Аудио	Intel HD Audio, встроенный микрофон и динамик
Порты ввода/вывода	USB 2.0 – 1 шт.; USB 3.0 – 1 шт.; COM порт (RS-232) – 1 шт.; VGA порт – 1 шт.; HDMI – 1 шт.; RJ-45 для 10/100/1000Mbps Ethernet – 1 шт.
Устройства передачи данных	Сетевой адаптер 10/100/1000 Мбит/с; Беспроводной адаптер Intel Wireless LAN 802.11 a/b/g/n/ac; Bluetooth 4.0

Таблица Е.2 – Метрологические характеристики тепловизора Testo 890-2

Наименование характеристики	Значение
Диапазоны измерений температуры, °C	От -30 до +100; От 0 до +350; От 0 до +650; От +350 до +1200
Пределы допускаемой погрешности: абсолютной, °C относительной, %	±2 (от -30 до +100 °C включительно) ±2 (свыше 100 °C)
Спектральный диапазон, мкм	От 8 до 14
Угол поля зрения, ...°	42x32
Температурная чувствительность при 30 °C, не более, °C	0,04
Тип детектора (пикселей)	FPA 640x480

Таблица Е.3 – Основные технические характеристики тепловизора Testo 890-2

Наименование характеристики	Значение
Электропитание, В	5
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	253x126x132
Масса с аккумулятором, кг	1,63
Подключение к ПК	USB 2.0
Запись изображения	Карта SD
Температура эксплуатации, °C	От -15 до +50
Температура хранения, °C	От -30 до +60
Относительная влажность, %	От 20 до 80
Пространственное разрешение (IFOV), мрад	0,71

Таблица Е.4 – Технические характеристики течеискателя SDT-270

Наименование характеристики	Значение
Дисплей	Жидкокристаллический (128 x 64 мм) с подсветкой
Встроенные датчики	Ультразвуковой датчик; Инфракрасный температурный датчик; Тахометр с лазерным целеуказателем
Запись данных	4000 записей. Одновременное сохранение записей со всех датчиков: запись ультразвуковых файлов в диапазоне частот от 15,1 до 190,7 кГц. Запись преобразованных ультразвуковых файлов
Рабочая температура, °C	От -15 до +60
Погрешность измерения уровня ультразвука, дБ	±0.5

Таблица Е.5 – Основные метрологические и технические характеристики VS-3D

Наименование характеристики	Значения
Диапазон измерений амплитудного значения виброускорения, м/с <sup>2</sup>	От 1 до 50
Диапазон измерений СКЗ виброскорости, мм/с	От 1 до 80
Диапазон рабочих частот, Гц	От 10 до 1000
Пределы допускаемой основной относительной погрешности при измерении виброускорения на базовой частоте 79,6 Гц, %: - в диапазоне измерений от 1 до 5 м/с <sup>2</sup> включительно - в диапазоне измерений от 5 до 50 м/с	±10 ±5
Пределы допускаемой основной относительной погрешности при измерении виброскорости на базовой частоте 79,6 Гц, %: - в диапазоне измерений от 1 до 5 мм/с включительно - в диапазоне измерений от 5 до 80 мм/с	±10 ±5
Неравномерность амплитудно-частотной характеристики при измерении виброускорения и виброскорости относительно базовой частоты в диапазонах частот, %, не более: от 10 до 20 Гц включительно и от 640 до 1000 Гц от 20 до 640 Гц включительно	±20 ±10
Пределы допускаемой дополнительной относительной погрешности, вызванной изменением температуры окружающей среды, в диапазоне рабочих температур, в долях от пределов допускаемой основной относительной погрешности	1,5
Нормальные условия измерений: температура окружающей среды, °C	От 15 до 25
Условия эксплуатации: температура окружающей среды, °C	От -20 до +50

Таблица Е.6 – Технические характеристики ELPI-25

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерений давления	От 0 до 25 МПа
Запись и отображение	30 циклов
Усреднение измеренной кривой	По 30 циклам с возможностью отображения минимальной и максимальной величин
Электронная компенсация температурного дрейфа датчика давления	Есть
Цифровая фильтрация данных	Есть
Амплитудная погрешность	1 %, не более
Работа на оборотах двигателя	От 35 до 2000 об/мин
Средний радиус действия беспроводного датчика	10 м