

Пальтов Сергей Алексеевич

**КОНТРОЛЬ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ  
СИСТЕМ ИНДИЦИРОВАНИЯ**

Специальность 05.08.05 – «Судовые энергетические установки  
и их элементы (главные и вспомогательные)»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственная морская академия имени адмирала С.О. Макарова».

Научный руководитель – кандидат технических наук, профессор  
Александр Семенович Пунда

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, доцент Александр Мстиславович Никитин  
кандидат технических наук, профессор Семен Иванович Золотарев

Ведущая организация ФГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций»

Защита состоится «4» марта 2010 г. в 14-30 часов в аудитории 21 на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 223.002.02 при ФГОУ ВПО «Государственная морская академия имени адмирала С.О. Макарова» по адресу: 199106, Санкт-Петербург, ВО 21 линия, д. 14А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВПО «Государственная морская академия имени адмирала С.О. Макарова».

Автореферат разослан «3» февраля 2010 г.

Ученый секретарь  
Совета по защите докторских  
и кандидатских диссертаций Д 223.002.02  
доктор технических наук,  
профессор



В.А. Петухов

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Пальтов, С.А. Системы электронного индицирования рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания // Эксплуатация морского транспорта. – 2008. – № 2 (52) – С. 63 – 66.

2. Пальтов, С.А. Влияние неравномерности вращения коленчатого вала на точность измерения среднего индикаторного давления в судовых двигателях внутреннего сгорания // Эксплуатация морского транспорта. – 2008. – № 4 (54) – С. 59 – 62.

3. Пальтов, С.А. Использование диаграммы скорости изменения давления в качестве дополнительного диагностического источника информации // Эксплуатация морского транспорта. – 2009. – № 2 (56) – С. 60 – 65.

4. Пальтов, С.А. Методика контроля показателей рабочего процесса малооборотных ДВС // Двигателестроение. – 2009. – № 2 (236). – С. 56 – 57.

результатами натурального эксперимента подтвердило достоверность предложенной методики.

3. Разработан и доказан метод определения средней величины при значительном разбросе диагностических параметров по цилиндрам двигателя. Сущность метода заключается в последовательном нахождении среднего значения между двумя, рядом стоящими точками, до тех пор, пока не будет вычислена средняя величина параметра, близкая к оптимальному значению. Автором предложены формулы для расчета среднего значения для пяти-, шести-, семи- и восьмицилиндрового двигателя. Предложенный метод применяется в случае, если разница между максимальным значением диагностического параметра и его минимальным значением более 20 % и числе цилиндром менее восьми.

4. Впервые проведено исследование отклонения экстремумов производной индикаторной диаграммы  $\frac{dP}{d\varphi}$  при возникновении различных неисправностей

(неплотность ЦПГ, поздний/ранний впрыск топлива, повышенная/пониженная цикловая подача, неисправность форсунки) и доказана возможность применения этого диагностического параметра для оценки технического состояния судового двигателя.

5. Проведено исследование влияния неравномерности вращения коленчатого вала на значение среднего индикаторного давления с целью выявить значение вносимой погрешности и обоснованности применения фирмами, производящими электронные системы индицирования с двумя датчиками оборотов на двигатель.

6. Результаты диссертационной работы внедрены в отдел ледокольного и пассажирского флота Санкт-Петербургского филиала ФГУП «Росморпорт» в виде методических рекомендаций по контролю технического состояния среднеоборотных двигателей и внедрены в учебный процесс на курсах повышения квалификации судовых механиков при Государственной морской академии имени адмирала С. О. Макарова. Внедрения подтверждены актами внедрения и использования, которые находятся в приложении.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Техническое состояние судового двигателя – это качество его узлов и деталей в данный момент времени или совокупность косвенных показателей, значение которых определяет его технические характеристики.

Состояние эксплуатирующегося двигателя оценивается мерой утраты им работоспособности и экономичности в связи с износами деталей и узлов, загрязнением и закоксовыванием зазоров между подвижными деталями и в проходных сечениях, нагарообразованием на рабочих поверхностях деталей и газозооных трактов. Обычно оценка технического состояния производится в результате разборки двигателя, очистки и обмеров его деталей и различных сопряжений. Такие операции трудоемки и не всегда целесообразны из-за последующего нарушения трущихся поверхностей при их переборке.

Сложность конструкции двигателя, большое количество узлов и агрегатов, подлежащих контролю приводит к тому, что в настоящее время расходы на поддержание технической готовности двигателя в 5-10 раз превосходят затраты на его производство, а поиск неисправностей в двигателе занимает 50-80 % ремонтного времени. Предупредить отказы и преждевременные переборки двигателя позволяют системы технической диагностики двигателя (СТД). При наличии грамотно построенной СТД время поиска неисправностей двигателя может быть сокращено в десятки раз. Так внедрение СТД в практику эксплуатации судовых двигателей внутреннего сгорания способствует росту экономичности 2–3%, увеличению ресурса 20–50 %, снижению расхода запасных частей на 10–15% .

Использование систем технической диагностики в практике эксплуатации двигателей дает возможность решать задачи: повышения эксплуатационного к.п.д. и ресурса за счет поддержания высокого технического уровня ДВС; понижения затрат эксплуатации и уменьшения потребности в запасных частях; сокращения времени поиска неисправностей; сокращения ремонтных и регулировочных работ.

Структура систем технической диагностики содержит следующие элементы: оборудование, предназначенное для измерения, обработки результатов измерения и сбора диагностической информации, и диагностические методики (алгоритмы) обработки результатов измерений.

В качестве оборудования для измерения диагностических параметров в настоящее время все больше применяются портативные электронные системы индицирования. Эффективность использования данных систем зависит от качества их настройки. В настоящее время до сих пор остается открытым вопрос оценки погрешностей этих приборов при их использовании для индицирования

судовых двигателей. Зачастую, даже правильно настроенный прибор выдает искаженные результаты. Поэтому оценка погрешности прибора, а в особенности выявление степени ее влияния на результаты измерений является важной задачей. Следует так же отметить, что как таковых четко выработанных рекомендаций по вводу этих приборов в эксплуатацию не имеется. Инструкции по эксплуатации, поставляемые вместе с приборами, дают только общие рекомендации по настройке и установке.

Вышеупомянутые электронные системы индицирования являются всего лишь обычными измерительными приборами, в то время как анализ результатов измерения и выводы, вытекающие из этого анализа, должен выполнять обслуживающий персонал. Отсюда вытекает необходимость создания эффективного алгоритма обработки результатов измерений по которым можно судить о текущем техническом состоянии двигателя. Другими словами нужна эффективная методика диагностирования. Разработка эффективной диагностической методики обработки результатов измерений с использованием электронных систем индицирования является одним из основных вопросов при создании СТД, определяющим элементом которой служит наиболее соответствующий набор контролируемых параметров, позволяющий достаточно полно охарактеризовать техническое состояние и работоспособность двигателя. Наконец, методика должна быть достаточно простой и оперативно применимой с минимальными затратами труда, времени и средств.

В настоящее время существует больше количество методик оценки технического состояния двигателя. Но главный недостаток существующих методик диагностирования двигателей заключается в том, что стремление авторов придать методике наибольшую информативность и полноту делает ее громоздкой и сложной для понимания обслуживающим персоналом. Большинство существующих методик разработаны и апробированы на стендовых двигателях, что требует их адаптации для судовых условий эксплуатации двигателя. Для учета влияния внешних факторов, оказывающих воздействие на двигатель в судовых условиях эксплуатации, многие авторы прибегают к выводу уравнений, учитывающих зависимость между диагностическим параметрами и параметрами определяющими режим работы двигателя, что приводит так же к усложнению методики, а так как уравнения зависимости выводятся по статистическому материалу, собранному для определенного типа двигателей, следует, что их результаты не могут претендовать на универсальность.

**Цель и задачи исследования.** Основной целью диссертационной работы является создание для обслуживающего судовую энергетическую установку персонала эффективной методики оценки технического состояния двигателя на основе контроля параметров рабочего процесса с использованием электронных

- в ходе обработки результатов измерений возможно появление кодов неисправностей не только в неисправном цилиндре, но и технически исправных цилиндрах. Исходя из этого, при анализе кодовой таблицы на этапе контроля показателей рабочего процесса по цилиндрам следует сконцентрировать внимание на тех цилиндрах, в которых проявляется наибольшее количество кодов неисправностей и которые наиболее полно характеризуют ту или иную неисправность в эталонной таблице неисправностей;

- экстремум в точке 2 функции скорости изменения давления следует использовать только для оценки угла опережения подачи топлива по степени приближения к оси абсцисс, чем меньше угол опережения подачи топлива, тем ближе точка к оси;

- при анализе технического состояния среднеоборотного двигателя не следует использовать экстремум в точке 4 функции скорости изменения давления, так как велико влияние погрешности вносимой индикаторным каналом

Результаты натурального эксперимента полностью подтвердили результаты численного эксперимента и достоверность разработанной методики контроля показателей рабочего процесса. Достоверность численного эксперимента также подтверждена индикаторными диаграммами с теми или иными неисправностями, которые сняты в условиях эксплуатации на современных двигателях и предоставленные автору фирмами производителями электронных систем индицирования.

**В приложениях** приведены графики и диаграммы исследования факторов оказывающих влияние на результаты измерений при использовании электронных систем индицирования, результаты численного и натурального эксперимента, индикаторные диаграммы с теми или иными неисправностями снятыми на современных двигателях в условиях эксплуатации.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен обзор исследований по технической диагностике судовых двигателей, который позволил выработать рациональные методологические решения задачи диагностирования судовых двигателей.

2. Разработана эффективная двухуровневая методика контроля показателей рабочего процесса основанная на анализе отклонения диагностических параметров от их средней величины. Методика основана на тех диагностических параметрах, которые позволяют зарегистрировать портативные электронные системы индицирования и которые наиболее полно отражают неисправности и являются наиболее чувствительными к изменению параметров рабочего процесса двигателя. Сопоставление результатов численного моделирования с

где  $\alpha$  – вероятность появления отклонения, превышающего  $\Delta_{\max}$  ( $\alpha$  принималось равным 0,05);  $t_{\alpha}$  – квантиль распределения Стьюдента. Далее сравнивая отклонение  $\Delta$  с  $\Delta_{\max}$ . Если  $\Delta > \Delta_{\max}$ , то с вероятностью  $P = 1 - \alpha$  отклонение  $\Delta$  считаем промахом и его отбрасывают.

Так же автор использовал в работе результаты экспериментальных исследований проводимых на кафедре «ДВС и АСЭУ» Государственной морской академии имени адмирала С.О. Макарова на судах Балтийского морского пароходства и опубликованные в технических отчетах кафедры. В частности использовался экспериментальный материал по двигателю 6ДКРН56/100 на котором имитировались следующие неисправности:

- уменьшена цикловая подача топлива (цилиндр недогружен, неисправен ТНВД). Имитация осуществлялась путем варьирования хода запорного винта дренажной полости форсунки;

- слишком ранний/поздний впрыск и воспламенение топлива. Имитация осуществлялась путем варьирования угла опережения подачи топлива;

- плохое сгорание топлива (неисправность форсунки). Имитация осуществлялась путем изменения затяга форсунки и применением сопел с изношенными отверстиями.

Анализ влияния неисправностей на показатели рабочего процесса осуществлялся только по трем диагностическим параметрам на режиме 85% от номинальной нагрузки. В качестве диагностических параметров использовались:

- $P_i$  – среднее индикаторное давление;
- $P_{\max}$  – максимальное давление цикла;
- $T_{\text{ex}}$  – температура отработавших газов.

Отклонения параметров по цилиндрам отсчитывались от его базового уровня (эталонных значений). Но из-за недостаточно тщательной регулировки двигателя отклонения диагностических параметров на базовом режиме отличаются от эталонных значений. Для оценки влияния неисправностей использовались «чистые» отклонения, которые определялись:

$$\Delta = \Delta^{\text{опыт}} - \Delta^{\text{базов}} \quad (8)$$

где  $\Delta^{\text{опыт}}$  – отклонение диагностического параметра в опыте с данной неисправностью;  $\Delta^{\text{базов}}$  – отклонение параметра в данном цилиндре до введения неисправности. Основной целью было подтверждение результатов численного эксперимента.

В ходе натурального эксперимента на лабораторном двигателе были выявлены следующие особенности, которые необходимо учитывать в ходе проведения мероприятий по оценке технического состояния двигателя:

систем индицирования. При этом разработанная методика должна не терять своей информативности, быть достаточно полной и универсальной.

Для достижения этой цели в работе были поставлены следующие задачи:

1. Определить минимально необходимую совокупность диагностических параметров, отображающих состояние рабочего процесса и позволяющих выявлять часто встречающиеся при эксплуатации судовых двигателей неисправности;

2. Установить причинно-следственные связи между выбранной совокупностью диагностических параметров и проявлением той или иной неисправности и на этой основе составить алгоритм диагностирования.

В дополнение к основным задачам автор в диссертационной работе ставит дополнительные задачи:

1. Дать критическую оценку существующим на современном рынке электронным системам индицирования;

2. Исследовать и оценить влияние разных факторов на достоверность измеренных параметров при использовании данного класса приборов.

**Объектом исследования** являются судовые двигатели, главные и вспомогательные.

**Предмет исследований.** Реагирование теплотехнических параметров ( $P_{\max}$  – максимальное давление сгорания,  $P_{\text{comp}}$  – давление сжатия,  $P_{\text{ex}}$  – давление на линии расширения в точке  $36^\circ$  п.к.в. после ВМТ (верхняя мертвая точка),  $P_i$  – среднее индикаторное давление,  $P_s$  – давление воздуха в продувочном ресивере,  $T_{\text{ex}}$  – температура отработавших газов, экстремумы производной индикаторной диаграммы  $\frac{dP}{d\varphi}$ ) на неисправности системы воздухообеспечения и топ-

ливоподачи. Влияние внешних факторов (неравномерность вращения коленчатого вала, колебания и сопротивления в индикаторном канале, некорректная установка положения ВМТ) на точность измерения диагностических параметров при использовании портативных электронных систем индицирования.

**Методологической основой и теоретической базой** являются отечественные и зарубежные исследования в области параметрической диагностики, основные положения термодинамики, теории ДВС, методы теории планирования экспериментов. Экспериментальные исследования выполнялись на основе современных ГОСТов и методов, рекомендуемых при проведении стендовых и эксплуатационных испытаний двигателей. Для анализа влияния различных видов неисправностей на показатели рабочего процесса в работе применялось численное моделирование. Оценка погрешностей определения экспериментальных величин была осуществлена с помощью методов теории погрешно-

стей. В работе использовалась современная анализирующе-регистрирующая аппаратура.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов** обеспечены применением известных методов системного и логического анализа и синтеза, общепризнанного математического инструментария, а также подтверждены результатами проведенных экспериментальных исследований.

**Научная новизна** исследования заключается в следующих результатах, выносимых автором на защиту:

1. Двухуровневая методика контроля показателей рабочего процесса для судовых двигателей, основанная на анализе отклонения диагностических параметров от их средней величины;

2. Новый метод определения средней величины при значительном разбросе диагностических параметров по цилиндрам двигателя;

3. Впервые проведенное исследование влияния неисправностей (слишком поздний/ранний впрыск топлива, повышенная/пониженная цикловая подача, неисправность форсунки, неплотности в цилиндре) на экстремумы дифференциальной составляющей индикаторной диаграммы  $\frac{dP}{d\varphi}$ ;

4. Анализ основных факторов, вызывающих погрешности измерения диагностических параметров при использовании портативных электронных систем индицирования.

**Личный вклад автора.** Автором сформулированы цель и задачи исследований на основе методов численного моделирования проведено исследование влияния различных неисправностей на характер изменения показателей рабочего процесса и предложена двухуровневая методика контроля рабочего процесса с оценкой отклонения параметров рабочего процесса относительно средних по двигателю, предложен новый диагностический параметр (экстремумы

функции  $\frac{dP}{d\varphi}$ ) и проведено исследование влияние различных неисправностей

на него. Результаты численного моделирования и достоверность методики были подтверждены автором натурными экспериментами.

**Практическая ценность.** Результаты исследований, разработанная двухуровневая методика контроля показателей рабочего процесса внедрены в отдел ледокольного и пассажирского флота Санкт-Петербургского филиала ФГУП «Росморпорт» при оценке технического состояния среднеоборотных двигателей и внедрены в учебный процесс на курсах повышения квалификации судовых механиков при Государственной морской академии имени адмирала С.О.

боты провел экспериментальное исследование с целью подтверждения характера изменения параметров рабочего процесса при возникновении ряда неисправностей. Так же целью исследования являлось практическое подтверждение методики диагностирования по среднему значению параметров рабочего процесса. В ходе эксперимента имитировались следующие неисправности:

- уменьшенная цикловая подача в цилиндре двигателя. Имитация неисправности осуществлялась за счет увеличения высоты хода перепускного клапана ТНВД с регулированием по концу подачи;

- увеличенная цикловая подача в цилиндре. Имитация неисправности осуществлялась за счет уменьшения высоты хода перепускного клапана ТНВД с регулированием по концу подачи;

- загрязнение фильтра компрессора. Имитация неисправности связанной с загрязнением фильтра имитировалась путем закрытия части фильтра кожухом.

Испытания были проведены на лабораторном двигателе 5 ЧН 22/32. Индицирование производилось прибором «The Doctor» (модель IS3) фирмы «Denkra АВ» на режиме 85 % от номинальной нагрузки при работе двигателя на ВРШ (ВРШ – винт регулируемого шага) и частоте вращения  $n = 484$  об/мин.

При индицировании фиксировались: положение топливрегулирующего органа – УН, давление и температура воздуха в продувочном ресивере –  $P_s, T_s$ , температуры отработавших газов по каждому цилиндру –  $T_{ex}$ , нагрузка на гидротормозе –  $P_{гт}$ , температура окружающего воздуха (термометр тип ТН-3), барометрическое давление (барометр МД-49-2), показания дифференциального манометра измеряющего разность давления до и после фильтра.

Для выявления резко выделяющихся результатов (промахов) применялся следующий подход. Определяли среднее значение  $\bar{x}$  и среднеквадратичное отклонение  $s$  диагностического параметра  $x$  для  $n$  замеров по формулам:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (5)$$

где  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  – значение диагностического параметра измеренного на одном и том же режиме для одной и той же неисправности;  $n$  – число замеров.

Затем рассчитывали отклонение:

$$\Delta = x_{\max} - \bar{x} \quad (6)$$

где  $x_{\max}$  – наибольшее значение  $x$ .

После определяли предельное отклонение:

$$\Delta_{\max} = t_{\alpha} s \quad (7)$$

погрешность изменяется с 5 % до 1,8 %. Поэтому при определении средней величины, следует руководствоваться следующими правилами:

- Если разница между максимальным значением диагностического параметра и его минимальным значением не более 20 %, то средняя величина параметра вычисляется, как среднеарифметическое значение данных параметров в каждом цилиндре.

- Если разница между максимальным значением диагностического параметра и его минимальным значением более 20 % или число цилиндров меньше восьми, то среднюю величину следует определять по следующим зависимостям, которые получены и апробированы автором:

Для пятицилиндрового двигателя:

$$X_{cp} = 0,5^{i-1} (X_1 + 4(X_2 + X_4) + 6X_3 + X_5) \quad (1)$$

Для шестицилиндрового двигателя:

$$X_{cp} = 0,5^{i-1} (X_1 + 5(X_2 + X_5) + 10(X_3 + X_4) + X_6) \quad (2)$$

Для семицилиндрового двигателя:

$$X_{cp} = 0,5^{i-1} (X_1 + 6(X_2 + X_6) + 15(X_3 + X_5) + 20X_4 + X_7) \quad (3)$$

Для восьмицилиндрового:

$$X_{cp} = 0,5^{i-1} (X_1 + 7(X_2 + X_7) + 21(X_3 + X_6) + 35(X_4 + X_5) + X_8) \quad (4)$$

где  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$  – значение измеренного параметра по цилиндрам;  $i$  – количество цилиндров в двигателе.

Для числа цилиндров свыше восьми значение величины вычисляется, как среднеарифметическое значение данных параметров в каждом цилиндре.

Предложенная автором двухуровневая методика обладает по сравнению с существующими методиками, следующими **преимуществами**:

- простотой использования и компактностью благодаря 2-х этапной оценке параметров рабочего процесса, что делает методику ориентированной на персонал разного уровня подготовки;

- независимостью от режима работы двигателя, так как оценка осуществляется относительно среднего значения;

- возможностью применения для различных типов двигателя.

**В четвертой**, заключительной, главе приведены результаты натурального эксперимента, подтверждающие данные численного эксперимента, а также проверка достоверности и эффективности разработанной методики оценки технического состояния двигателя.

На базе дизельной лаборатории кафедры «ДВС и АСЭУ» Государственной морской академии имени адмирала С.О. Макарова автор диссертационной ра-

Макарова. Результаты исследований имеют практическую ценность, так как позволяют:

1. Сократить процесс поиска неисправности за счет эффективной структуры алгоритма поиска неисправностей;

2. Уменьшить материальные затраты на ремонт двигателя за счет своевременного выявления неисправностей в начале их развития;

3. Повысить эффективность использования обслуживающим персоналом современных электронных систем индицирования;

4. Перейти от регламентных сроков обслуживания двигателя к техническому обслуживанию двигателя в зависимости от его фактического состояния, что позволит избежать лишних переборок и сократить трудоемкость работ.

**Апробация работы.** Итоги диссертационной работы докладывались на научной конференции профессорско-преподавательского состава Государственной морской академии имени адмирала С.О. Макарова (март 2009 г.) и Всероссийской научно-технической конференции «Развитие двигателестроения в России» (апрель 2009 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 4 печатных работы, все издания опубликованы в рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки РФ изданиях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержит 41 наименование отечественных и зарубежных работ, и семь приложений. Включает в себя 131 страницу текста, в том числе 25 рисунков, 30 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, дана общая характеристика работы.

**В первой главе** проведен обзор исследований по технической диагностике судовых дизелей. Проведен анализ современных электронных систем диагностики судовых двигателей внутреннего сгорания.

В настоящее время разработкой и созданием систем диагностирования для морского транспорта занимаются ведущие дизелестроительные фирмы и научно-исследовательские институты Швеции, Норвегии, Дании, России и других стран. Однако, несмотря на значительный опыт, не выработано единого мнения о применяемых методах диагностирования и количестве регистрируемых параметров. Зарубежные системы технической диагностики основываются на более или менее глубоком диагностировании важнейших элементов дви-

гателя: системы воздухообмена, агрегатов наддува, цилиндропоршневой группы, топливной аппаратуры, охлаждающих устройств.

Используемые на судах морского флота электронные системы контроля рабочего процесса подразделяются на стационарные диагностические комплексы и портативные электронные индикаторы (электронные системы индицирования).

Наиболее известны, следующие стационарные диагностические комплексы: система MJ-1 (фирмы «Аутроника»), «Дата Тренд» (фирма «Норконтролл»), «Меком» (фирма «Statronik»), CYLDET-СМ (фирма «АSEA»), SEDS (фирма «Зульцер»), «Либратор 500» (США), «Machinery Health Monitoring System Jer 5800» (фирма ENDEVCO), система СС-10 (фирма «B&W») и др.

Если стационарные системы осуществляют постоянный мониторинг состояния двигателя, то портативные системы электронного индицирования предназначены для периодического контроля параметров. Данный тип приборов благодаря своей компактности, дешевизне, функциональности и простоте обслуживания нашел широкое применение на флоте.

Среди российских производителей наиболее известны следующие портативные системы электронного индицирования: универсальный программно-аппаратный диагностический комплекс «Дизель-Адмирал-Экспресс» созданный НПК «Гарант», комплекс «КОНТЕСТ-СКАН» научно-производственной фирмы «Техприборсервис» (ЦНИИМФ), системы контроля индикаторного процесса судовых дизелей «МКСД-11,21» группы предприятий «Marine Computer Systems Ltd» и многие другие. Но в силу объективных причин, на морских судах получили известность и применение индикаторы зарубежных фирм «BAEWERT GMBH» (тип HLV 94 M), «LEUTERT» (тип DPI), «MAN B&W» (система PMI), Denkra AB (прибор «The Doctor»), Diesel Intellect International (система мониторинга и диагностики дизелей ДИ-7), Malin Instruments Limited (тип Malin 6000) и другие.

Анализ параметров и принципа работы существующих систем показывает, что предлагаемое на современном рынке многообразие портативных электронных систем кажущееся. Отличие одной системы от другой проявляется зачастую лишь в форме реализации средства обработки и визуализации процесса контроля.

Электронные системы индицирования позволяют измерить и зафиксировать большое количество данных, однако, по сути, они являются обыкновенным электронными измерительными приборами, которые пришли на смену старым механическим приборам индицирования. В то время как анализ результатов измерения и выводы должен делать обслуживающий персонал. Сократить время при оценке технического состояния двигателя на основе выполненных измерений помогают специальные методики диагностирования. При-

Эталонная таблица идентификации нарушения рабочих процессов по отдельным цилиндрам

Код неисправности	$P_{comp}$	$P_{max}$	$P_i$	$T_{ex}$	$P_{ex}$	$dP/d\phi$ т.1	$dP/d\phi$ т. 2	$dP/d\phi$ т.3	$dP/d\phi$ т.4
Неисправности									
Рабочий процесс в цилиндре протекает нормально	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Нарушение плотности цилиндра (прогорание выпускного клапана или поломка поршневых колец)	-1	-1	-1	+1	-1	-1	0	+1	-1
Слишком ранний впрыск и воспламенение топлива	0	+1	+1	0	0	0	+1	+1	+1
Слишком поздний впрыск и воспламенение топлива	0	-1	-1	0	0	0	-1	-1	-1
Уменьшена цикловая подача топлива (цилиндр недогружен, неисправен ТНВД*)	0	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	0
Увеличена цикловая подача топлива (неправильная регулировка ТНВД)	0	+1	+1	+1	+1	0	0	+1	0
Плохое сгорание топлива (неисправность форсунки)	0	-1	0	0	0	0	0	-1	-1

ТНВД\* – топливный насос высокого давления

При определении среднего значения диагностического параметра по цилиндрам, следует учитывать, что мы всегда имеем разброс исследуемого параметра в определенных пределах, даже если двигатель полностью исправен и хорошо отрегулирован. Это объясняется тем, что в каждом цилиндре рабочий процесс носит индивидуальный характер. Что приводит к возникновению погрешности в определении средней величины диагностических параметров. Проведенные автором исследования показали, что с увеличением количества цилиндров двигателя от 4 до 12 при разнице самого максимально и самого минимального значения контролируемого параметра по цилиндрам менее 20%

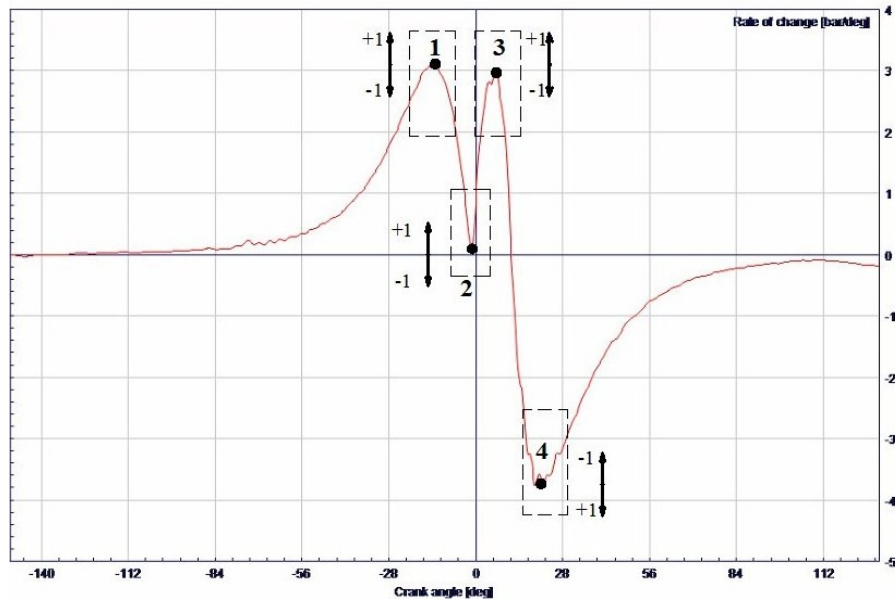


Рис. 2. Диаграмма скорости изменения давления в цилиндре двигателя с характерными точками:

1 – сжатие; 2 – начало воспламенения; 3 – горение; 4 – расширение

После проведения индицирования определяется среднее значение каждого диагностического параметра и допустимый диапазон его отклонения (рекомендуемые уставки, если нет иных указаний, представлены табл. 2), сравнивая замеренные параметры по цилиндрам с его средним значением и используя предложенный на первом этапе метод кодирования выписываются наборы кодов неисправностей по каждому цилиндру. Полученные наборы кодов сравниваются с кодами, предложенными в эталонной диагностической табл. 3. Эталонная таблица разработана с привлечением численной модели реализующей алгоритм расчета рабочего процесса только в одном цилиндре, без расчета процесса газообмена.

Таблица 2

Величина принимаемых уставок

Показатель	Отклонение, %
$P_{comp}$	$\pm 2,5$
$P_{max}$	$\pm 3,5$
$P_i$	$\pm 2,5$
$T_{ex}$	$\pm 5,0$
$P_{ex}$	$\pm 5,0$
$dP/d\phi$	$\pm 5,0$

менительно к судовым двигателям проблемы диагностирования исследованы ЦНИДИ, ВВМИУ, ЛИВТ, ЛВИМУ, ЦНИИМФ и другими НИИ и учебными заведениями и помещены в трудах А.М. Александрова, Л.В. Станиславского, Е.В. Дмитриевского, Ю.А. Магнитского, Р.М. Васильева-Южина, Б.М. Левина, И.В. Возницкого, А.А. Обозова, А.Ю. Конькова, В.А. Лашко и др.

Обзор существующих в настоящее время методик контроля показателей рабочего процесса показал, что имеющиеся в настоящее время методики довольно громоздки и сложны для понимания, ориентированы на определенный тип двигателя.

Следует отметить, что практически все существующие в настоящее время алгоритмы оценки технического состояния по показателям рабочего процесса были разработаны до появления портативных электронных систем индицирования и ориентированы под авторские системы технической диагностики или же стационарные диагностические системы, но никак не на современные портативные электронные системы индицирования.

Поэтому необходимо создание эффективной и простой для обслуживающего судовую энергетическую установку персонала методики оценки технического состояния двигателя на основе контроля параметров рабочего процесса и ориентированной на современные электронные системы индицирования. При этом разработанная методика должна быть достаточно полной и универсальной.

**Вторая глава** посвящена анализу и исследованию влияния внешних факторов на точность замеров при использовании электронных систем индицирования.

На качество замеров при использовании электронных систем индицирования влияет большое количество внешних факторов. Наиболее существенные из них:

- погрешность неточного задания положения ВМТ поршня;
- погрешность из-за искажения сигнала в индикаторном канале;
- погрешность из-за неравномерности вращения коленчатого вала.

Вопросы, связанные с анализом погрешностей и их устранение нашли отражение в работах А.А. Обозова, В. Лашко, А. Конькова, А.Ю. Самойленко и др.

Погрешность задания положения ВМТ, как правило, объясняется систематическими ошибками при первоначальной установке. Наиболее существенно это сказывается на точности определения среднего индикаторного давления и мощности, при отклонении ВМТ от истинного значения на  $1^\circ$  п.к.в. погрешность среднего индикаторного давления и индикаторной мощности может достигнуть 5 – 7 %. В настоящее время для установки положения ВМТ применяют три способа:

- по диаграмме сжатия-расширения при выключенной цикловой подаче;
- по меткам на маховике;
- с помощью экстраполяции линии сжатия на ось ординат.

Однако данные способы не позволяют снизить погрешность при измерении показателей рабочего процесса до приемлемого уровня, так как мы не можем в условиях эксплуатации обеспечить точность установки положения ВМТ меньше  $0,5^\circ$  п.к.в. Поэтому после выполнения измерений и перед началом обработки результатов измерений необходимо при помощи опции корректировки положения ВМТ в прилагаемом к электронному индикатору программном обеспечении, дополнительно произвести корректировку данной величины по производной индикаторной диаграммы ( $dP/d\phi$ ). Для этого необходимо выполнить экстраполяцию участка сжатия данной диаграммы до пересечения с ось абсцисс ( $\frac{dP}{d\phi} = 0$ ), это и будет истинное значение ВМТ, такая программная корректировка позволяет сократить погрешность до оптимальной величины (до 0,5 %).

Существенную помощь при корректировке положения ВМТ оказывает подход основанный на сравнительном анализе эталонной индикаторной диаграммы полученной на математической модели с индикаторной диаграммой измеренной в условиях эксплуатации. Суть предлагаемого подхода заключается в следующем, по результатам индицирования для каждого режима определяются средние по цилиндрам идентификационные показатели: давление конца сжатия, угол начала воспламенения топлива, угол достижения максимального давления сгорания, максимальное давление цикла. Затем для каждого режима производится расчет индикаторной диаграммы на ЭВМ. Путем корректировки в исходных данных добиваются совпадения расчетных параметров с идентификационными показателями, определенными по измеренным индикаторным диаграммам. Затем определяется погрешность ВМТ, как разность значений положений ВМТ на эталонной индикаторной диаграмме и измеренной индикаторной диаграммы для того или иного режима работы. После определения величины погрешности в программном обеспечении электронного индикатора при помощи опции корректировки положения ВМТ окончательно устанавливается ее правильное положение. По данному методу можно выявить «чистую» погрешность установки ВМТ.

Следующий фактор, обусловленный искажением сигнала в индикаторном канале, является наиболее трудно устранимым, так как представляет собой функцию с переменными параметрами, изменяющимися по мере изменения нагрузки на двигатель.

**На втором этапе** осуществляется контроль регулировок и неисправностей топливной аппаратуры по цилиндрам двигателя (слишком поздний/ранний впрыск топлива, повышенная/пониженная цикловая подача, неисправность форсунки), а также неисправности ЦПГ (цилиндро-поршневая группа) (нарушение плотности цилиндра), которые невозможно выявить при контроле на первом этапе. В качестве диагностических параметров здесь используются, как общеизвестные параметры ( $P_{comp}$ ,  $P_i$ ,  $P_{max}$ ,  $T_{ex}$ ), так и новые, в частности экстремумы производной индикаторной диаграммы ( $dP/d\phi$ ) и показатель значение давления при  $36^\circ$  после ВМТ ( $P_{ex}$ ).

Экстремумы производной индикаторной диаграммы  $\frac{dP}{d\phi}$  (см. рис. 2) в ка-

честве диагностического параметра используются впервые, до настоящего момента данный тип диаграмм использовался только для оценки механической напряженности двигателя. Каждая из точек (экстремум) характеризует протекание того или иного процесса в цилиндре двигателя. Первый экстремум (точка **1**) характеризует протекание процесса сжатия в цилиндре двигателя, а следовательно, характеризует неисправности связанные с нарушении плотности цилиндра. Здесь примечательно то, что данный экстремум служит более точным указателем данного класса неисправностей, т.к. измеряемое по индикаторной диаграмме давление сжатия нельзя определить достоверно точно, обычно за давления сжатия принимается точка начала воспламенения. Второй экстремум (точка **2**) характеризует точку начала воспламенения топлива, здесь регистрируется угол начала подачи топлива, чем позже происходит впрыск топлива, тем ближе к оси абсцисс располагается второй экстремум функции. Третий и четвертый экстремумы (точки **3**, **4**) характеризуют протекание процесса сгорания в цилиндре и следующий за ним процесс расширения, данные участки регистрируют изменение цикловой подачи и неисправности форсунок, ТНВД.

тимых значений записываем код [0]. Полученные наборы кодов сравниваем с эталонной диагностической табл. 1 разработанной с привлечением замкнутой численной модели рабочего процесса многоцилиндрового двигателя с изобарным наддувом и выявляется неисправность повлекшая появление данных кодов. После устранения неисправностей переходим ко **второму этапу (уровню)** контроля показателей рабочего процесса.

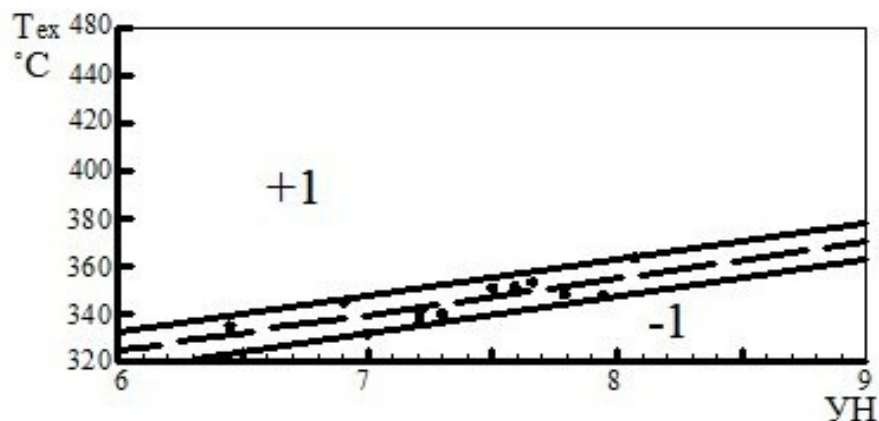


Рис. 1 Номограмма  $T_{ex} = f(UH)$  для контроля технического состояния двигателя

Таблица 1

Эталонная таблица идентификации нарушения рабочих процессов в целом по двигателю

Неисправности	Код неисправности	$P_s$	$P_i$	$T_{ex}$
Загрязнение фильтра компрессора <b>Дополнительный признак:</b> Перепад давлений на фильтре компрессора (нормальное 50-60 мм.вод.ст)	-1	0	+1	
Загрязнение проточной части компрессора	-1	0	0	
Загрязнение соплового аппарата турбины	+1	0	+1	
Загрязнение выпускных клапанов	0	0	+1	
Высокое противодавление за турбиной <b>Дополнительный признак:</b> Давление газа перед утилизационным котлом (нормальное 2-3 кПа)	-1	0	+1	

В индикаторном канале, сообщающем цилиндр двигателя с воспринимающим давление элементом индикатора, создается сопротивление течению газа, при снятии индикаторных диаграмм возникает некоторая разность давлений в цилиндре двигателя и в полости канала около элемента индикатора, воспринимающего давление. Величина этой разности давлений зависит от формы, длины и площади поперечного сечения канала, скорости изменения давления в цилиндре и от величины давления в цилиндре.

Помимо сопротивления, оказываемого протеканию газов, в соединительном канале могут возникнуть колебания давления. Индикаторный канал является колебательным, динамическим звеном. Совпадение собственной частоты колебаний индикаторного канала и частоты колебаний газа в индикаторном канале приводят к искажению результатов индицирования.

В связи с тем, что исследований по влиянию погрешности вносимой индикаторным каналом для малооборотных двигателей в настоящее время проведено недостаточно, то была поставлена задача оценки степени ее влияния на данные измерения при индицировании данного типа двигателей.

Исследование проводилось по двум составляющим погрешности: погрешности от сопротивления, возникающего на входе в индикаторный канал, вследствие разности диаметров цилиндра и канала, погрешности возникающей вследствие колебаний газа в индикаторном канале.

Несмотря на то, что погрешность сопротивления  $\Delta p_k$  возрастает с увеличением нагрузки, эта погрешность для малооборотных судовых двигателей незначительна. Из выполненного расчета следует, что в малооборотных двигателях  $P_{max} \gg \Delta p_k$ . Например для двигателя 7ДКРН50/200 на 100% режиме работы  $P_{max} = 151,6$  бар, а сопротивление на входе в канал и перед датчиком  $\Delta p_k = 0,92$  бар.

Касательно погрешности, возникающей из-за колебаний газа в индикаторном канале, были выполнены расчеты для двигателя 7ДКРН74/180 по формулам, предложенным профессором А.Ю. Самойленко. Расчет показал, что частота колебаний в газа в цилиндре двигателя в 4,3 меньше, чем в канале, а, следовательно, явления резонанса, являющегося основной причиной погрешности, не может иметь место. Зачастую параметры рабочего процесса малооборотных двигателей не превосходят значений принятых в расчете, а следовательно, это соотношение будет справедливо и для других двигателей этого класса.

Индикаторная диаграмма на выходе системы электронного индицирования представляет собой осредненное значение нескольких циклов при средней

частоте вращения коленчатого вала двигателя. Но из-за непостоянства крутящего момента частота вращения коленчатого вала носит колебательный характер, вызывая искажение формы индикаторной диаграммы относительно своего среднего значения. Влияние неравномерности вращения коленчатого вала довольно слабо освещено в научной литературе. Фирмы производители электронных систем индицирования не дают информации по этому вопросу. Обычно производители электронных систем индицирования ограничиваются рекомендацией по использованию совместно с датчиком ВМТ (TDC-датчик) CAE-датчика (Crank Angle Encoder) угла поворота коленчатого вала, с целью сокращения погрешности вносимой неравномерностью вращения.

Исследование влияние неравномерности вращения коленчатого вала двигателя заключалось в расчете среднего индикаторного давления и проводилось по двум типам индикаторных диаграмм: индикаторной диаграммы снятой в условиях эксплуатации с учетом осреднения частоты вращения и индикаторной диаграммы построенной на основе измеренной, но уже при определенной неравномерности вращения коленчатого вала. Расчет проводился для малооборотного двигателя, так как степень неравномерности у них выше. Это связано с тем, что неравномерность вращения коленчатого вала обратно пропорциональна квадрату частоты вращения двигателя. В среднеоборотных двигателях величина неравномерности вращения коленчатого вала значительно меньше в связи с тем, что данные типы двигателей оборудованы маховиками и имеют частоту вращения выше, чем у малооборотных двигателей.

Расчет среднего индикаторного давления для двигателя 6ДКРН 26/98 показывает, что для полученной при индицировании двигателя индикаторной диаграммы  $P_i=26,26$  бар, а для индикаторной диаграммы при переменной частоте вращения  $P_i=26,35$  бар. Сравнивая обе величины между собой, получим, что величина погрешности вносимой неравномерностью вращения коленчатого вала менее 1%. Таким образом, это доказывает, что степень неравномерности вращения коленчатого вала оказывает несущественное влияние на индикаторные показатели.

**Третья глава** отведена описанию методики контроля технического состояния двигателя, анализу информативности и характера изменения диагностических параметров при возникновении различных неисправностей посредством математического моделирования.

В связи с тем, что показатели рабочего процесса и процессы в двигателе находятся в сложных взаимосвязях, то выявить какой элемент конструкции повлиял на отклонение того или иного теплотехнического параметра от нормы довольно сложно.

Поэтому исходя из анализа работ посвященных контролю рабочего процесса автором было предложено проводить анализ рабочего процесса поэтапно, а в частности:

- I этап – оценка качества рабочего процесса в целом по двигателю;
- II этап – оценка качества рабочего процесса в отдельных цилиндрах.

Оценка отклонения параметров рабочего процесса производится относительно средних по двигателю, это исключает необходимость учитывать влияние режима работы двигателя на процессы в отдельных цилиндрах. В качестве контролируемых параметров в работе принимаются теплотехнические параметры ( $P_{max}$ ,  $P_{comp}$ ,  $P_{ex}$ ,  $P_i$ ,  $P_s$ ,  $T_{ex}$ , экстремумы производной индикаторной диаграммы  $\frac{dP}{d\varphi}$ ). Теплотехнические параметры становятся информативными до

того, когда загрязнение (засорение), износ, прогорание и т.д. достигнут определенных пределов, после которых наступает резкое ухудшение характеристик, что рассматривается уже как неисправность. Поэтому теплотехнические параметры наиболее подходят для предупреждения нарушения процессов в эксплуатационных условиях.

**Первый этап (уровень)** методики является начальным и служит для оценки общетехнического состояния двигателя, а именно для оценки состояния системы воздухообеспечения двигателя и общего ухудшения процессов во всех цилиндрах – плохое топливо, износ распылителей форсунок. На данном этапе необходимо по результатам индицирования и замера показаний контрольных приборов двигателя записать средние значения экспериментальных точек  $P_s$ ,  $T_{ex}$ ,  $P_i$ , УН (указатель нагрузки) для того или иного режима. Затем нанести эти точки на номограммы  $P_i = f(UH)$ ,  $P_S = f(UH)$ ,  $T_{ex} = f(UH)$

(см.рис.1), которые строятся по данным стендовых, ходовых и теплотехнических испытаний и протоколам индицирования. Если бы не было влияния на рабочий процесс дизеля параметров внешней среды, качества топлива, регулировок топливной аппаратуры и других эксплуатационных факторов, то параметры  $P_s$ ,  $T_{ex}$ ,  $P_i$  были бы связаны с УН «жестко», т.е. имели бы линейный закон изменения. Влияние эксплуатационных факторов приводит к рассеиванию точек относительно средней линии (пунктирная линия) и образованию поля эксплуатационных значений функций  $P_i = f(UH)$ ,  $P_S = f(UH)$ ,

$T_{ex} = f(UH)$  (поле ограничено сплошными линиями). Если нанесенная на номограмму экспериментальная точка располагается выше верхней ограничительной линии поля, то этому событию приписывается код [+1], если ниже нижней ограничительной линии код – [-1]. При попадании точки в поле допус-