

УДК 629.5.064: 681.518.54

Тымкив А.В., Денисов В.Г.  
ОНМА

## **МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ.**

Техническая эксплуатация судовых энергетических установок неотделима от эксплуатации судов. Бурное развитие науки, техники и технологии, которое характерно для последних десяти лет, привело к появлению новых типов судов, новых принципов построения судовой энергетической установки. Техническая эксплуатация судовых энергетических установок неотделима от эксплуатации судов. Бурное развитие науки, техники и технологии, которое характерно для последних десяти лет, привело к появлению новых типов судов, новых принципов построения судовой энергетической установки. Отличия в типе энергетической установки, виде используемого энергоносителя (жидкого топлива, газообразного, твердого) ставит вопрос совершенствования методов и средств технического использования, обслуживания и ремонта.

Сегодня, в связи с ростом цен на энергоносители, возрастающей сложностью механизмов, систем и конструкций судна, повышением требований к надежности и экономической безопасности со стороны международных, классификационных обществ, значительно увеличиваются расходы судовладельцев на содержание судна и техническое обслуживание.

Повышается значение и актуальность задач предотвращения возможных отказов, прогнозирования остаточного ресурса, оптимизация сроков и объемов технического обслуживания и ремонта судовых технических средств, с учетом особенностей характеристик группы судов конкретной судоходной компании (тип судна, возраст, район плавания и т.д.). В свою очередь, это требует разработки новых методов, форм и средств технического обслуживания с учетом современных требований.

Анализ показывает, что важное место в решении этих проблем занимает задача совершенствования информационных процессов для обеспечения технической эксплуатации судна и энергетической установки. Технологические процессы сбора, анализа и обработки

информации, а тем более принятия решения остаются прерогативой опыта и интуиции судовых специалистов.

Современное развитие информационных технологий, использующих новые поколения микропроцессорной техники, системы спутниковой связи, измерительной техники создает предпосылки для реализации информационных процессов технической эксплуатации на качественно новом уровне.

Развитие методов технической эксплуатации СЭУ на базе информационных технологий требует высокого уровня формализации процедур сбора, обработки и анализа исходной информации и ее эволюции вплоть до получения нужного решения, т.е. качественно другого уровня организации информационной среды.

Можно утверждать, что решение этих проблем возможно путем комплексных исследований существующих методов и средств получения, обработки, анализа информации и разработки методов технической эксплуатации судовой энергетической установки на базе современных информационных технологий и внедрения нового информационно-технического обеспечения.

Вопросы исследования и разработки энергосберегающих, ресурсосберегающих и экологичных технологий является одним из важнейших направлений научно-технического прогресса. Реализация этого направления применительно к судовым энергетическим установкам (СЭУ) прямо связана с повышением эффективности их технической эксплуатации.

Повышение безопасности и эффективности работы механизмов СЭУ во многом связано с развитием и усовершенствованием информационных методов контроля и мониторинга параметров характеризующих безотказность основных узлов.

Широкое использование технической диагностики (ТД) вызвано как стремлением максимально использовать ресурс работы машин и механизмов, так и требованием снижения их энерго- и материалоемкости.

Предупредительный характер ТД заключается в постоянном наблюдении и контроле технического состояния трибосистемы (ТС) с целью обнаружения ее состояния, предшествующего выходу из строя. Различают тестовую диагностику, связанную с необходимостью осуществления специальных внешних воздействий, и функциональную, которая служит для оценки работоспособности ТС в процессе ее функционирования [3].

Трибодиагностика как совокупность средств и методов непрерывного контроля состояния фрикционных характеристик подвижных сопряжений играет все более важную роль в развитии теории и практики трения, изнашивания и смазки. Эта роль обусловлена общей тенденцией современной техники создания замкнутых систем с так называемым мониторингом, изменяющих свою работу в соответствии с заданной программой и изменением внешних условий. В такой системе реализуется функция измерения (оценки) структурных параметров трибосистемы, непрерывного контроля, прогнозирования ее технического состояния, автоматического управления [6].

С точки зрения практики одним из основных этапов трибодиагностики является создание диагностического комплекса, практически реализующего идею распознавания состояния ТС. Диагностический комплекс воспринимает характеристические сигналы от датчиков и с помощью определенных операций формирует ряд диагностических признаков, которым в соответствии ставятся определенные состояния ТС, или значения ее внутренних параметров, и дает заключение о возможности дальнейшей эксплуатации.

Для получения диагностической информации измеряют параметрические характеристики ТС: коэффициент трения, температуру в зоне контакта, скорость изнашивания, величины вибраций, акустических колебаний, переменных деформаций и усилий. Текущий контроль параметров, а также исследование продуктов изнашивания — наиболее эффективные методы диагностики ТС.

Одна из тенденций современной техники — стремление создать системы, не требующие замены смазочного материала, т.е. сопряжения с автокомпенсацией износа, самосмазывающиеся, с одноразовой подачей смазочного материала. Однако, несмотря на большую перспективность таких систем, они, по-видимому, не могут быть использованы во всех без исключения машинах и механизмах. Для контроля состояния смазочной среды с целью поддержания ее свойств в нужных пределах требуются средства диагностики различной сложности, которые могут быть ориентированы на определение содержания в смазочной среде частиц изнашивания, параметров химического состава среды.

Нейторно-активационный метод. Если облучить детали узлов трения, то по изменению радиоактивности частиц износа этих деталей, попадающих в систему смазки в результате изнашивания, можно осуществлять непрерывный контроль технического состояния

узлов трения с точностью до микрометра. Другое направление развития этого метода связано с анализом концентрации радионуклидов в смазочном масле.

Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) этот метод основан на резонансном поглощении электромагнитных волн веществом, помещенным в сильное магнитное поле при наложении значительно более слабого переменного радиочастотного магнитного поля, которое возмущает прецессию ядер — носителей магнетизма. С помощью ЯМР определяется состав, строение, межмолекулярное взаимодействие веществ в твердых, жидких или газообразных состояниях.

Эмиссионная спектрофотометрия. Интенсивность изнашивания трущихся сопряжений, используя этот метод, можно оценить, измеряя в масле концентрацию элементов, попадающих туда в результате изнашивания деталей пар трения. Спектральный анализ позволяет дифференцированно оценивать суммарный износ нескольких групп.

Атомно-абсорбционная спектрометрия этот метод основан на испарении исследуемой пробы в анализаторе (в пламени, плазме) и измерении интенсивности света от источника дискретного излучения, проходящего через пар исследуемой пробы. По степени ослабления интенсивностей линий определяемого элемента судят о концентрации его в пробе. Анализ эффективности определения содержания продуктов изнашивания в масле показывает, что этот метод обеспечивает учет преимущественно мелких частиц (меньше 10 мкм), находящихся в пробе масла [8].

Атомно-флуоресцентная спектрофотометрия этот метод заключается в том, что пары исследуемой пробы облучают резонансным для искомого элемента излучением и регистрируют его флуоресценцию. Обычно для облучения пробы используют рентгеновское излучение. Этот метод не накладывает ограничений на размер частиц изнашивания, находящихся в пробе, поэтому можно быстро определить присутствие в смазочном материале крупных «частиц, характеризующих катастрофический режим изнашивания. Атомно-флуоресцентная спектрофотометрия пригодна лишь для тех металлов, которые обладают регистрируемым резонансным излучением. Метод рентгеновской флуоресценции близок по своим возможностям к методу атомноабсорбционной спектрометрии, за исключением определения таких металлов, как литий и магний. Однако, несмотря на свои достоинства, этот метод не нашел широкого применения в практике диагностирования.

ИК- и УФ-спектроскопия. С помощью методов качественного и количественного молекулярного спектрального анализа устанавливают молекулярный состав исследуемого образца и определяют содержание продуктов окисления масла, солей карбоновых кислот, сульфатов и неорганических нитритов. С этой целью проводят сравнение ИК- и УФ-спектров масла до и после эксплуатации, и по изменению интенсивности полос поглощения судят о его степени загрязненности. Для регистрации ИК-спектров могут быть использованы приборы типа ИКС и СФ-26.

Абсорбционная спектрофотометрия этот метод количественного молекулярного анализа основан на использовании закона Бугера-Ламберга-Бера (БЛБ), устанавливающего связь между интенсивностями падающего и прошедшего через вещество света в зависимости от толщины поглощающего слоя и концентрации вещества.

Однако, применительно к маслам, закон БЛБ необходимо рассматривать как полуэмпирический. Этот метод позволяет оценить эффективность работы масляных фильтров и качество рабочего процесса двигателя, а использование светофильтров с различной длиной волны пропускания — среднюю дисперсность частиц.

Спектральные методы имеют ряд существенных недостатков:

- с их помощью нельзя установить характер износа в парах трения;
- форму и размер частиц износа;
- соотношение наибольшего их размера с наименьшим;
- общее число частиц износа в пробе масла;
- спектрометры не реагируют на частицы больших размеров (более 10 мкм), т.е. на частицы износа образующиеся при аварийном или катастрофическом изнашивании;
- спектральные установки сложны, громоздки, дорогостоящи и требуют квалифицированного обслуживания.

В условиях эксплуатации судовых технических средств (СТС) имеет место значительная необратимость технического состояния деталей и узлов механизмов и возможных отклонений от нормальных состояний.

Существует большое количество методов обнаружения отклонений от нормального технического состояния, среди которых наиболее широкое распространение приобрели статистические, которые основаны на контроле фазовых координат объекта и, прежде

всего, методы, основанные на теории статистических решений и анализе временных рядов.

Статистические методы определения нарушений в работе СТС. Существует множество подходов к выявлению нарушений в работе сложных систем, в частности, диагностика системы на основе контроля переменных в реальном времени. Синтез алгоритмов определения нарушений в этих подходах начинается с выбора набора контролируемых переменных, которые довольно полно характеризуют объект управления. Естественно, что проще всего контролировать входные и выходные переменные объекта, или сигналы обновлений (погрешностей) между выходами объекта и модели, которая настраивается в контуре идентификации адаптивной системы управления.

Идентификационный подход к раннему выявлению нарушений в работе сложных систем состоит в следующем. Рассматривается задача последовательного выявления нарушений в процессе адаптивной идентификации модели объекта управления. Исходной информацией для решения задачи идентификации и определения нарушений являются временные ряды  $y(t)$ ,  $u(t)$ , поступающие в реальном масштабе времени на адаптивный идентификатор. На практике широкое распространение приобрели алгоритмы, связанные с критерием минимума суммы квадратов погрешностей идентификации и его модификации, которые определяются принятой системой весов. Наиболее распространенным является метод наименьших квадратов, в котором все погрешности имеют одинаковый вес.

Методы определения нарушений в работе СТС на основании прогноза. Прогнозирование технического состояния (ТС), наряду с задачами контроля ТС и поиска места и причин отказа, также являются задачами технического диагностирования. С целью обеспечения высокой надежности современной техники в производстве и поддержания ее в процессе эксплуатации широко используют разнообразные методы и автоматизированные средства неразрушающего контроля и технического диагностирования. Однако, трудоемкость операций контроля для различных видов техники составляет от 15 до 50% трудоемкости основных операций ее изготовления. Затраты за весь период эксплуатации на ремонт и техническое обслуживание техники в связи с ее износом превышают стоимость новых машин в 5—8 раз.

С момента начала создания и применения объекта появляется возможность проведения экспериментальных исследований. Таким

образом, появляется возможность экспериментальной проверки правильности ранее использованных моделей и принятых решений [7].

Методы эвристического прогнозирования. Эвристическое прогнозирование заключается в интуитивном выборе важнейших и решающих обстоятельств. Большая часть этой интуиции состоит в полусознательном сравнении всех величин и вариантов, с помощью которых быстро устраняется все маловажное и несущественное. Несомненным достоинством эвристических методов является возможность избежать грубых ошибок, особенно в области скачкообразных изменений прогнозируемой величины. Преимущества индивидуальных методов заключаются в максимальном использовании индивидуальных способностей эксперта и незначительности психологического давления на отдельного эксперта [5].

Исследования, проведенные с индуктивными датчиками износа и апробация данного метода [1, 2] в системе диагностирования Д-3 показали преимущества данного способа по сравнению с традиционными методами контроля: сокращение ряда трудоемких операций, таких как отбор, транспортировка, хранение, приготовление проб масла; возможность получения непрерывной информации о процессе изнашивания.

Данный метод позволяет значительно сократить стоимость и трудоемкость процесса диагностирования, а так же автоматизировать процесс обработки и анализа диагностической информации.

Использование датчика для диагностики механизмов различной мощности требует разработки методики расчета основных его параметров и конструктивных элементов.

К параметрам работы датчика можно отнести диапазон измерений, чувствительность, точность, период работы до насыщения и т.д. В свою очередь, параметры датчика связаны с габаритными размерами конструктивных элементов датчика. Поэтому необходимо установить общие закономерности процесса поступления продуктов изнашивания на датчик.

В результате работы механизма происходит изменение физико-химических свойств масла и его старение. Это связано с тем, что масло, работая при высокой температуре, соприкасается с воздухом внешней среды, парами воды, пылью, продуктами сгорания топлива, металлическими поверхностями деталей механизма. Кроме того, в масло постоянно поступают продукты изнашивания узлов трения.

Таблица 1. Классификация методов обнаружения нарушений в работе СТС

| Класс                                 | Подкласс                                | Виды                                     | Особенности   |  |
|---------------------------------------|---|--|---|--|
| Без прогноза                          | Математические (по $y(t)$ )             | Расстояние от аналогов                   | Необходимость полного списка диагнозов и их признаков |  |
|                                       | Отнесение образов (по $y(t)$ )          | Отнесение к одному из классов-образов    |   |  |
|                                       | Статистические (по $y(t)$ )             | Применение теории статистических решений |   |  |
|                                       |   | Анализ временных рядов                   |   |  |
|                                       | Идентификационные (по $y(t)$ и $u(t)$ ) | С бесконечной памятью                    |   | Контроль обновляющих последовательностей   |
|                                       |   |  |   | Контроль нормализующих последовательностей |
|                                       |   |  |   | Использование F-статистики                 |
|                                       |   |  |   | По алгоритму Калмана–Мейна                 |
|                                       |   | С конечной памятью                       |   | По критическим значениям                   |
|                                       |   |  |   | По возникновению «прыжка» параметров       |
| Дисконтирование устаревшей информации |   |  |   |  |
|                                       | Многомодельный подход                   |  |   |  |

Продукты загрязнения масла разделяются на органические и неорганические. Органические примеси состоят, в основном, из продуктов неполного сгорания топлива, поступающих в масло из камеры сгорания, а также продуктов термического разложения, окисления и полимеризации масла. Также в масло поступает вода, соединения серы и свинца. Неорганические примеси состоят из ПИ, а также неорганических загрязнений. Исследование состава загрязнений методами седиментационного анализа [4] показало, что размер



80% частиц загрязнений находится в пределах 0,5—2 мкм, но отдельные частицы загрязнений достигают размера 100 мкм и более.

Загрязнение масла в работающем механизме идет непрерывно. На скорость поступления загрязнений в масло оказывают влияние множество факторов:

- качество масла;
- вид топлива;
- тип двигателя;
- система смазки;
- техническое состояние механизма;
- режим и условия работы.

Накопление примесей в масле происходит постепенно и со временем может приостановиться.

Контроль содержания различных видов загрязнений в масле позволяет судить о техническом состоянии отдельных агрегатов двигателей и обслуживающих систем.

Наиболее полную информацию о техническом состоянии узлов трения механизмов несут "прямые" свидетели разрушения трущихся поверхностей — продукты изнашивания, поступающие в масло.

В целях диагностирования износа в различных областях народного хозяйства нашли использование спектральные, феррографические, эмиссионные и другие методы анализа смазочного масла на содержание ПИ. Применяются различные параметры диагностирования для оценки технического состояния механизмов по результатам анализа масла. Наибольшее распространение в качестве параметра диагностирования технического состояния получила концентрация ПИ. При этом по результатам исследований обосновываются предельно допустимые значения концентраций, при повышении которых механизмы выводятся из эксплуатации для проведения работ по ТО. Этот параметр привлекает внимание тем, что он непосредственно замеряется в процессе контроля и не требует дальнейшей обработки данных. Так же в качестве параметра диагностирования используется скорость возрастания концентрации ПИ в масле. Развитие исследований в этой области вызвано тем, что концентрация ПИ в масле не всегда объективно отражает состояние механизма. Известны случаи наносных отказов механизмов при концентрации ПИ, не превышающей предельно допустимые значения.

Наличие большого количества методов диагностирования и отсутствие научно-обоснованных рекомендаций по их выбору в зави-

симости от задач исследований вызывают необходимость проведения анализа, позволяющего обосновать применение того или иного метода.

Для выбора параметра диагностирования технического состояния механизмов необходимо сформулировать требования, которым он должен удовлетворять.

Параметр должен зависеть только от технического состояния механизма.

Величина параметра должна зависеть от технического состояния механизма однозначно, т.е. любому техническому состоянию должно соответствовать только одно значение параметра.

Кроме того, метод диагностирования должен быть достаточно чувствительным для возможности определения износного отказа на ранних стадиях его возникновения.

Можно сделать вывод о том, что применение методики определения величины износа узлов трения по изменению количества осевших ПИ на датчиках, установленных в системы смазки с учетом времени работы механизма дает возможность получения непрерывной информации о состоянии механизма и прогнозирования времени его работы до проведения ремонтных работ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балицкий Ф.Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М. А. Иванова, М.А. Соколова, Е.И. Хомяков. / Отв. ред. М.Д. Генкин. — М.: Наука, 1984. — 119 с.
2. Балицкий Ф.Я. Современные методы и средства виброакустического диагностирования машин и конструкций / Ф.Я. Балицкий, М.Д. Генкин, М.А. Иванова и др. / Под ред. КВ- Фролова. — М., 1990. — 252 с.
3. Биргер И.А. Определение диагностической ценности признаков // Кибернетика. — 1968. — № 3. — С. 80-85.
4. Денисов В.Г., Матвеевский Б.Р. Контроль состояния узлов судовых двигателей в процессе эксплуатации // Вестник машиностроения. — 1989.
5. Логов А.Б. Теоретические основы функциональной вибродиагностики горных машин: Автореф. дис... докт. техн. наук. — Кемерово, 1991. — 41 с.
6. Лосев Б. М. Точность, достоверность и помехозащищенность спектральных методов виброакустического диагностирования

- Вибрация и вибродиагностика. Проблемы стандартизации: Тез. докл. 2 Всесоюз. науч.-техн. конф. — Горький, сент., 1988. — С. 170.
7. Макаров Р.А. Средства технической диагностики машин. — М.: Машиностроение, 1989. — 233 с.
  8. Марченко Б.Г., Мыслович М.В. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. /—4 Киев: Наук, думка, 1992. — 195 с.