

УДК 621.438

Тымкив А.В., Денисов В.Г.,
ОНМА

МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Многочисленные исследования, проводимые в последние годы [2], показали, что в качестве диагностического параметра основных узлов трения судовой энергетической установки (СЭУ) наиболее эффективным и достоверным является изменение концентрации продуктов изнашивания (ПИ) в смазочном масле и рабочей среде (сжатый воздух, выпускные газы, гидравлическая жидкость) [1, 4, 5].

Этот параметр привлекает внимание тем, что он непосредственно замеряется в процессе контроля и не требует дальнейшей обработки данных. Также в качестве диагностического параметра (ДП) может использоваться скорость возрастания концентрации ПИ в масле. Развитие исследований в этой области вызвано тем, что концентрация ПИ в масле не всегда объективно отражает состояние механизма.

Наличие большого количества методов и отсутствие научно обоснованных рекомендаций по их выбору в зависимости от задач исследований вызывают необходимость проведения анализа, позволяющего обосновать применение того или иного метода.

Для выбора метода необходимо сформулировать требования, которым он должен удовлетворять:

1. Диагностический параметр должен зависеть только от технического состояния механизма.
2. Величина изменения ДП должна зависеть от изменения технического состояния, механизма или узла.
3. Метод диагностирования должен быть достаточно чувствительным для возможности определения износа на ранних стадиях его возникновения.

Принципиальную схему процесса массообмена ПИ в масле можно представить как показано на рис. 1.

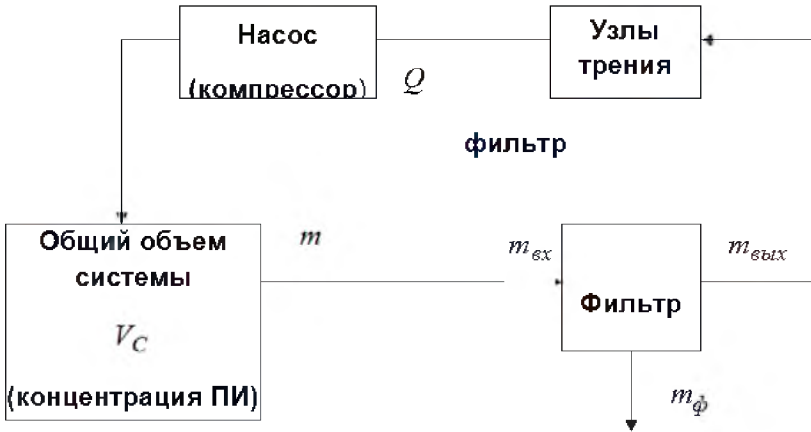


Рис. 1. Принципиальная схема массообмена ПИ в масле механизма

Q - объемный расход масла;

V_c - объем системы смазки;

K_0 - начальная концентрация ПИ;

m - масса ПИ, отделившихся от поверхности трения;

m_{ex} - ПИ на входе в фильтр;

$m_{вых}$ - ПИ на выходе из фильтра;

m_ϕ - ПИ, задержанные фильтром.

При рассмотрении данной схемы и сделав допущения, что: объем масла, находящегося в фильтре равен нулю; интенсивность образования ПИ, расход масла в системе Q , общий объем системы V_c и эффективность фильтра не изменяются. Объем масла в маслопроводах равен нулю, получим

$$K(t)V_c = K_0V_c + \int_0^t I_0 dt - \int_0^t m_\phi dt, \quad (1)$$

где $K(t)$ - концентрация ПИ в масле до фильтра;

I_0 - интенсивность образования ПИ.

Эффективность удаления ПИ с учетом эффективности фильтрации, выражается так

$$\phi = \frac{m_{\phi}}{m_{ex}} \quad \text{или} \quad m_{\phi} = \phi \cdot m_{ex}, \quad (2)$$

где ϕ - эффективность фильтра;

m_{ϕ} - ПИ, задержанные фильтром;

m_{ex} - ПИ на входе в фильтр.

Но массу частиц износа на входе в фильтр можно выразить как

$$m_{ex} = Q \cdot K(t), \quad (3)$$

где Q - объемный расход масла через фильтр.

После подстановки уравнение (2) и (3) в уравнение (1) получим

$$K(t)V_c = K_0V_c + \int_0^t I_0 dt - \int_0^t \phi \cdot Q \cdot K(t) dt. \quad (4)$$

После преобразований уравнение (4) будет иметь вид

$$K(t) = \left(K_0 - \frac{I_0}{\phi \cdot Q} \right) \exp\left(-\frac{\phi \cdot Q \cdot t}{V_c} \right) + \frac{I_0}{\phi \cdot Q}. \quad (5)$$

При постоянных условиях работы механизма достигается постоянная равновесная концентрация ПИ в смазочном масле [2]. Это обусловлено тем, что с ростом концентрации ПИ повышается интенсивность их осаждения фильтрами и выпадения в осадок, снижаются диспергирующие свойства масла. Кроме того, высокая интенсивность фильтрации может привести к малой величине равновесной концентрации. Из этого следует, что концентрации ПИ не удовлетворяет первому критерию оценки технического состояния механизма. Также не удовлетворяет этому критерию и скорость изменения концентрации ПИ.

Для решения задачи диагностирования износа по содержанию ПИ в масле применяют датчики-сигнализаторы наличия стружки в масле, магнитные пробки с самоуплотняющимися гнездами, позволяющими производить осмотр пробок в любой момент времени с анализом осадка ПИ. Устройства накопления ПИ с одновременным анализом их количества разрабатываются в ОГМА. При установке таких устройств в системы смазки механизмов принимая ряд допу-

щений, зная вероятный диапазон значений эффективности фильтра, учитывая его сменяемость и периодическую очистку, можно считать зависимость между массой ПИ, собранной устройством осаждения и износом узлов трения линейной. Это в ряде случаев удовлетворяет необходимой точности процесса диагностирования. Однако, в некоторых случаях точность диагностирования необходимо повысить.

Допуская пропорциональность изменения концентрации ПИ в масле до датчика массе осажденных ПИ на датчиках, можно записать:

$$K(t) = c \cdot m(t), \quad (6)$$

где c - коэффициент пропорциональности;
 $m(t)$ - масса ПИ на датчике.

Вводя показатель эффективности осаждения ПИ, собранных за время t можно получить выражение:

$$\psi = \frac{m_g}{Q \cdot K(t) \cdot t \cdot \epsilon}, \quad (7)$$

где ψ - эффективность осаждения ПИ;
 m_g - масса осадка, собранного датчиком за время t ;
 ϵ - коэффициент пересчета собственно массы ПИ в массу осадка.

Таким образом, решая уравнение (2), (3) и (4) можно по данным о массе осадка ПИ, собранного датчиками определить величину интенсивности износа, скорости изнашивания узлов трения и линейный износ, что обеспечивает непосредственный мониторинг износа узлов трения механизмов.

Вследствие влияния на скорость накопления ПИ в масле таких факторов, как режим и условия эксплуатации, периодичность замены масла, продолжительность работы сепараторов, состояния фильтров и др., изменение концентрации ПИ будет носить сложный характер. В общем виде зависимости изменения концентрации ПИ в масле, поступления и осаждения их в процессе работы двигателя приведены на рис. 2.

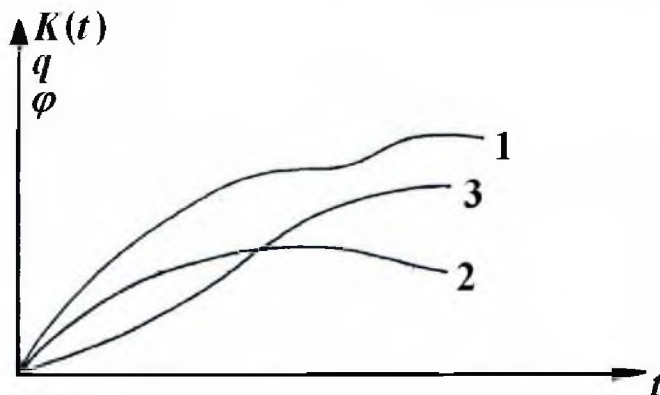


Рис. 2. Зависимость содержания ПИ в масле от времени работы механизма

- 1- текущая концентрация ПИ;
- 2 интенсивность поступления в масло;
- 3 - интенсивность осаждения ПИ фильтрами.

Из рис. 2 видно, что характер изменения концентрации ПИ в масле (кривая 1) значительно отличается от интенсивности их поступления (кривая 2). Это приводит к большому разбросу опытных данных, снижению точности и достоверности процесса диагностирования.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что концентрат ПИ неоднозначно оценивает техническое состояние и, следовательно, не отвечает второму требованию к критерию. Аналогичным недостатком обладает и параметр скорости изменения концентрации ПИ.

Вследствие нелинейности зависимости концентрации от наработки масла, скорость возрастания концентрации будет зависеть от момента времени, при котором произойдет скачок темпов поступления. Темп же поступления ПИ в масло однозначно может определять техническое состояние механизма.

Другими причинами, ограничивавшими использование методов измерения концентрации ПИ в масле является: сложность методик и установок для контроля ПИ, необходимость специальной подготовка обслуживающего персонала, предварительная подготовка проб масел для анализа. Кроме этого такие методы не дают возможности использования их для определения состояния узлов трения в любой момент времени.

Учитывая недостатки измерения величины износа по концентрации ПИ в масле, перспективным направлением является контроль интенсивности изнашивания и величины износа по количеству ПИ, поступивших за определенный промежуток времени Δt . При этом интенсивность фильтрации не оказывает влияния на изменение интенсивности изнашивания.

В этом случае количество ПИ Δq , поступающее за время $\Delta t = t_1 - t_2$, - на датчик, установленный на выходе масла из узла трения будет пропорционально изменению интенсивности изнашивания узлов трения I_0 :

$$\Delta q = c \int_{t_2}^{t_1} I_0 dt \quad (8)$$

или

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = c \bar{I}_h, \quad (9)$$

где \bar{I}_h - средняя интенсивность изнашивания;

c - коэффициент пропорциональности.

Если t будет величиной постоянной, то \bar{I}_h будет характеризовать техническое состояние узла трения.

Для решения вопроса о наиболее информативном параметре можно предположить, что ПИ поступают в масло из i трущихся пар. Причем при нормальном износе в единицу времени в масло поступает $m_1, m_2, m_3, \dots, m_i$ продуктов износа. Обозначим далее, что

$$m_2 = \alpha_2 m_1; m_3 = \alpha_3 m_1; \dots; m_i = \alpha_i m_1 \text{ и } \alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_4 > \dots > \alpha_i.$$

Тогда суммарное количество ПИ, поступающее в масло в единицу можно определить из уравнения:

$$I_m = \sum_{i=1}^m m_i = m_1 \left(1 + \sum_{i=2}^m \alpha_i \right). \quad (10)$$

Если в момент времени t_1 произойдет резкое ухудшение технического состояния i -го элемента и скорость износа его увеличится в n раз, то в этом случае мгновенное количество ПИ составит

$$I_{mn} = m_1 \left(1 + \sum_{i=2}^{m-1} \alpha_{i-1} + n\alpha_i \right). \quad (11)$$

Относительное изменение количества ПИ, поступающих в систему за единицу времени, можно определить из уравнения

$$\frac{I_{mn}}{I_m} = \frac{m_1 \left(1 + \sum_{i=2}^{m-1} \alpha_{i-1} + n\alpha_i \right)}{m_1 \left(1 + \sum_{i=2}^{m-1} \alpha_i \right)}, \quad (12)$$

или

$$\frac{I_{mn}}{I_m} = 1 + \frac{\alpha_1(n-1)}{1 - \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_i}. \quad (13)$$

Анализ этого уравнения показывает, что суммарное количество ПИ изменяется менее существенно, чем темп износа отдельного элемента. Причем, чем меньше удельный вес ПИ данного элемента в общем балансе, тем меньше относительное изменение суммарного количества ПИ.

Аналогично можно получить аналитическое выражение для относительного изменения концентрации ПИ:

$$\frac{K_{mn}}{K_m} = 1 + \frac{\Delta t \cdot m_1 \cdot \alpha_i (n-1)}{1 + \Delta t \cdot m_1 (1 - \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_i)}, \quad (14)$$

где Δt - промежуток времени между скачком интенсивности износов и замером концентрации;

K - концентрация ПИ.

Из приведенного уравнения видно, что относительное изменение концентрации при увеличении интенсивности износа одного элемента зависит от промежутка времени между скачком износа и моментом замера концентрации, а также от концентрации ПИ перед скачком. Численный анализ уравнения показывает, что при наработках до 60 часов относительное изменение концентрации существенно ниже относительного изменения суммарного количества ПИ, поступающих в масло. Таким образом, параметр концентрации менее чувствителен к изменению технического состояния двигателей, чем параметр интенсивности поступления ПИ в масло. Аналогичным недостатком обладает и параметр скорости изменения концентрации.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что определение величины износа узлов трения по изменению интенсивности поступления продуктов изнашивания в смазку с учетом времени работы механизма является наиболее информативным методом и может обеспечить возможность получения непрерывной информации о состоянии механизма и прогнозирования времени его работы до проведения ремонтных работ. Таким образом, в качестве основного метода мониторинга состояния узлов трения необходимо использовать массу осевших продуктов изнашивания на датчики за определенное время работы механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисов Е. А. Диагностика технического состояния смазываемых узлов трения по параметрам продуктов износа в масле // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2006. – № 8. – С. 18-21.
2. Шинкин В. А. Состояние и перспективы совершенствования технической эксплуатации СЭУ на базе средств и методов диагностики // Тез. докл. Всероссийск. научн. конф. «Параметры перспективных транспортных систем России». – М., 1994. – С. 162.
3. Миюсов М. А., Примачев М. Т. Торговый флот в условиях глобализации // Судостроение. – 2003. – № 9-10. – С. 16.
4. Ханмамедов С. А., Денисов В. Г., Холявко Л. П. Определение технического состояния основных элементов гидравлических элементов гидромашин, рулевых машин // Надежность судовых машин. – Николаев, 1984. – С. 15-20.
5. Гугуев О. Е., Денисов В. Г., Яцына К. В. Прогнозирование ресурса судовых механизмов и узлов с помощью датчика износа // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – Одесса: Дюл-Принт, 2007. – № 1. – С. 97-103.