

УДК 629.063.7:620.17

МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СРЕДЫ РАБОТАЮЩЕГО МАСЛА

Власов Ю.А., Удлер Э.И., Тищенко Н.Т., Земляной С.А., Таньков Р.Ю.
*ФГБОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»,
Томск, e-mail: yury2006@yandex.ru*

Разработан новый экспресс-метод диагностирования агрегатов карьерных автосамосвалов по параметрам работающего масла. В процессе эксплуатации двигателей и других агрегатов большегрузных автомобилей, имеющих замкнутую систему смазки, в работающее масло поступают продукты износа, топливо, охлаждающая жидкость. Загрязняющие компоненты и их концентрации в работающем масле характеризуют техническое состояние агрегатов машин. Математические зависимости дают возможность теоретически определить концентрацию загрязняющих компонентов в масле. Для этого используются сравнения диэлектрических свойств загрязняющих компонентов с диэлектрическими свойствами свежего масла. Предлагаемая схема колебательного контура позволяет разработать диагностический прибор, который по диагностическим критериям оценивает свойства работающего масла. Оценка диэлектрических свойств загрязняющих компонентов в работающем масле позволяет выявлять нарушения в техническом состоянии агрегатов автомобилей.

Ключевые слова: диагностика, карьерные автосамосвалы, работающее масло, диэлектрическая проницаемость

METHOD OF DIAGNOSING OF CAREER DUMP TRUCKS ON CHANGE OF DIELECTRIC PERMEABILITY OF THE ENVIRONMENT OF WORKING OIL

Vlasov Y.A., Udler E.I., Tischenko N.T., Zemlyanoy S.A., Tankov R.Y.
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, e-mail: yury2006@yandex.ru

The new express method of diagnosing of mechanisms of career dump trucks on parameters of working oil is developed. Engines and mechanisms of heavy-load cars have the closed system of greasing. In system of greasing of the engine, there are wear products, the gasoline and cooling liquid. Components of pollution and their concentration in working oil characterize a technical condition of mechanisms of cars. Mathematical dependences give the chance to define theoretically concentration of polluting components in oil. The assessment of dielectric properties of components of pollution in working oil allows defining violations in mechanisms of cars. Comparisons of dielectric properties of components of pollution with dielectric properties of fresh oil are for this purpose used. In work, the scheme of an oscillatory contour, which allows developing the diagnostic device, is considered. The device by diagnostic criteria estimates properties of working oil. The assessment of dielectric properties of pollution of components in working oil allows defining violations in a technical condition of mechanisms of cars.

Keywords: diagnostics, the career dump trucks, working oil, dielectric permeability

Диагностический контроль технического состояния агрегатов с замкнутыми системами смазки является неотъемлемой частью технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта (ТР) карьерных автосамосвалов. Необходимость такого контроля вызвана тем, что карьерные автосамосвалы имеют силовые агрегаты (двигатели внутреннего сгорания (ДВС), гидромеханические передачи (ГМП), гидравлические системы (ГС) и др.) высокой энергоемкости и работают в условиях повышенных, либо максимальных нагрузок. Такие транспортные средства в стоимостном выражении весьма дорогие, что в сочетании с большой трудоемкостью видов ТО и ТР и их высокой стоимостью делает безразборную оценку технического состояния данных транспортных средств весьма актуальной.

Постановка проблемы. В настоящее время эксплуатационная надежность карьерных автосамосвалов решается путем внедрения инструментального контроля, физико-химических методов анализа масла,

а также эмиссионного спектрального анализа масла (ЭСАМ). Для агрегатов с замкнутыми системами смазки такой комплексный подход с использованием информации, носителем и источником которой является работающее масло, позволяет решать проблемы повышения эксплуатационной надежности и эффективного использования смазочных масел.

Выбор метода диагностирования машин по параметрам работающего масла базируется на том, что работающее масло является неотъемлемым компонентом узла трения агрегата. При этом масло находится в постоянном контакте не только с поверхностями трения, но и с целым рядом других поверхностей, если происходит нарушение герметичности замкнутой системы смазки. Поэтому в процессе эксплуатации происходит изменение физико-химических свойств масел, обуславливающих ухудшение его эксплуатационных характеристик, изнашивание деталей, активацию процессов нагарообразования в ДВС и др.

Загрязняющие компоненты, попадающие в работающее масло от нарушения технического состояния агрегата, характеризуются только им присущими свойствами. Одним из таких свойств является диэлектрическая проницаемость среды [1].

Свежее масло, заливаемое в агрегат машины, имеет диэлектрическую проницаемость $\epsilon_1 = 2,4 \dots 2,5$. Поэтому все значения выше или ниже данного показателя будут характеризовать структурные изменения работающего масла. Измерение данных отклонений даст возможность оценивать наличие загрязняющих компонентов, а, следовательно, такие отклонения можно считать диагностическими признаками, по которым можно оценивать как техническое состояние агрегата, так и свойства работающего масла.

Решение поставленных задач. Работающее масло является бинарной смесью, эффективная диэлектрическая проницаемость ϵ^* которой складывается из диэлектрической проницаемости свежего масла ϵ_1 , принимаемого за эталон, и диэлектрической проницаемости загрязняющего компонента ϵ_2 , концентрацию которого требуется оценить.

В агрегате машины работающее масло представляет собой смесь композиционного диэлектрика с неупорядоченными загрязняющими компонентами. Истинное значение эффективной диэлектрической проницаемости в этом случае определяется между статистическими значениями смесей [2, 6].

Для оценки жидких загрязняющих компонентов в виде микрокапель воды, характеризующих попадание охлаждающей жидкости в картер агрегата, оптимально соответствует эмпирическая зависимость Оделевского для хаотически расположенных частиц в смеси:

$$\epsilon^* = A + \sqrt{A^2 + \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{2}}; \quad (1)$$

$$A = \frac{1}{4} [(3v_1 - 1)\epsilon_1 + (3v_2 - 1)\epsilon_2] \quad (2)$$

где $\epsilon_2 = 81$ – диэлектрическая проницаемость воды; v_1 и v_2 – объемные концентрации свежего масла и воды соответственно. При этом должно выполняться условие $v_1 + v_2 = 1$.

Для растворенного моторного топлива в масле приемлема зависимость Парнаса для мало отличимых компонентов дисперсной фазы (топлива) и дисперсионной среды (масла):

$$\lg \epsilon^* = v_1 \lg \epsilon_1 + (1 - v_1) \lg \epsilon_2, \quad (3)$$

где $\epsilon_2 = 1,90 \dots 2,05$ – диэлектрическая проницаемость бензина и дизельного топлива соответственно.

Оценить наличие металлических частиц в масле, образуемых в результате износа сопрягаемых деталей, по эффективной диэлектрической проницаемости смазочной среды можно используя упрощенную эмпирическую зависимость Брюггемана:

$$\epsilon^* = \frac{\epsilon_1}{(1 - v_2)^3}. \quad (4)$$

Здесь должно выполняться условие, что диэлектрическая проницаемость металлических частиц износа $\epsilon_2 \rightarrow \infty$ и $v_2 \ll 1$.

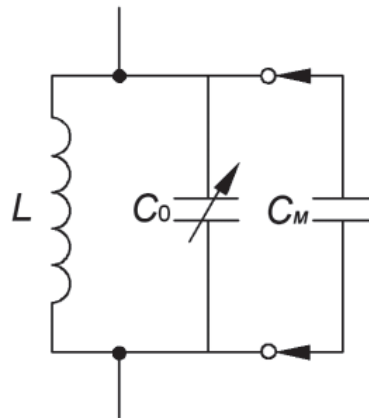
Загрязнение свежего масла продуктами абразивной пыли $\epsilon_2 = 4,5 \dots 16,0$ позволяет моделировать процесс оценки эффективной диэлектрической проницаемости смеси эмпирической зависимостью Оделевского–Винера для матричного расположения частиц в смеси:

$$\epsilon^* = \epsilon_1 \left(1 + \frac{v_2}{\frac{1 - v_2}{3} + \frac{v_2}{\epsilon_2 - \epsilon_1}} \right). \quad (5)$$

В этом случае изменение эффективной диэлектрической проницаемости ϵ^* связано с нарушением герметичности агрегата и возможностью свободного доступа частиц пыли в смазочное масло через неплотности в соединениях сопрягаемых деталей.

В настоящее время измерение диэлектрических величин осуществляется рядом электротехнических методов: мостовым методом; методом колебательного контура; методом фазочувствительного выпрямителя; определением диэлектрических потерь по величине затухания; калориметрическим методом [7].

Наиболее простым и информативным является резонансный метод по схеме колебательного контура от низкого напряжения (рисунок).



Принципиальная схема колебательного контура

В колебательном контуре емкость измерительной ячейки C_m включена параллельно катушки индуктивности L и переменной емкости C_0 . Колебательный контур питается колебаниями постоянной частоты $f_{\text{пост}}$. При отключении емкости измерительной ячейки C_m , колебательный контур настраивается подбором емкости C_0 в резонанс на частоту $f_{\text{пост}}$.

Собственная частота колебательного контура, определяемая формулой Томсона,

$$f_1 = 1 / (2\pi\sqrt{LC_0}), \quad (6)$$

совпадает с питающей частотой $f_{\text{пост}} = f$.

При включении в схему емкость измерительной ячейки C_m , результирующая емкость возрастет до $C_0 + C_m$, а собственная частота колебательного контура уменьшается

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 + C_m)}}. \quad (7)$$

В этом случае условие резонанса нарушается.

Для восстановления резонанса уменьшается переменная емкость на величину емкости подключаемой измерительной ячейки C_m .

Заполняя измерительную ячейку конденсатора чистым маслом с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 , емкость измерительной ячейки примет величину C_3 :

$$C_3 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 S}{d}, \quad (8)$$

где S – площадь электродов; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; d – расстояние между электродами.

Если в ячейку конденсатора поместить работающее масло, то величина емкости ячейки C_m будет отличаться величиной изменения диэлектрической проницаемости загрязняющего вещества.

$$C_m = \frac{\epsilon_0 \epsilon^* S}{d}. \quad (9)$$

Для сравнения частот с применением измерительной схемы (рис. 1) используется условный показатель импульсов, определяемый по формуле:

$$N = \frac{K_1 f_1 - K_2 f_2}{K_1 f_1}, \quad (10)$$

где K_1 и K_2 – частотные коэффициенты для свежего и работающего масел. По условному показателю импульсов оценивается качественный состав исследуемого масла в зависимости от вырабатываемого сигнала:

$$\begin{aligned} K_1 f_1 > K_2 f_2 & \text{ – положительный сигнал;} \\ K_1 f_1 < K_2 f_2 & \text{ – отрицательный сигнал.} \end{aligned} \quad (11)$$

Формула (10) является моделью оценки свойств работающих масел, определяемых в колебательном контуре, через импульсы частот, если схему колебательного контура преобразовать в схему измерительного прибора [4], где используется опорный и перестраиваемый частотные генераторы. Обозначив показатель импульсов N через значение индекса качества масла $I_{\text{км}}$, запишем модель (10) в виде:

$$I_{\text{км}} = \frac{F_1 - F_2}{F_1}, \quad (12)$$

где F_1 и F_2 – тактовая частота опорного и перестраиваемого генераторов.

Значение индекса качества масла $I_{\text{км}}$ является диагностическим критерием, по которому можно оценивать степень загрязненности работающего масла.

Практическое применение индекса $I_{\text{км}}$ предполагает сравнение с двумя диагностическими критериями – нулем и положительной величиной допустимой концентрации загрязнителя, определенной для состояния масла, не потерявшего свою работоспособность. Величину допустимой концентрации загрязняющего компонента можно рассчитать теоретически, используя зависимости (1)–(5), а также определить экспериментально, статистическими методами исследования, с приборным использованием схемы колебательного контура.

При отрицательном значении индекса качества масла делается заключение о наличии в работающем масле топлива. Положительное постепенно изменяемое значение индекса $I_{\text{км}}$ во времени свидетельствует о наличии воды в масле. При положительном неизменном значении $I_{\text{км}}$ судят о наличии в исследуемом масле продуктов износа или иных механических примесей. Пригодным к эксплуатации считается работающее масло с положительным неизменяемым значением $I_{\text{км}}$, величина которого ниже браковочного значения, полученного для загрязненного работающего масла.

Материалы и методы исследования

Теоретическая информация о техническом состоянии агрегата автомобиля вытекает из достаточно сложного анализа априорного обобщения экспериментального материала, полученного в результате целенаправленных исследований автомобилей в условиях эксплуатации. При большом количестве экспериментальных значений можно оценить величину диагностического параметра путем подбора теоретического распределения, близкого к экспериментальному. Однако экспериментальное распределение может существенно отличаться от теоретического, что будет приводить к погрешностям некоторых статистических характеристик распределения. По этой причине более универсальным методом является на-

хождение числовых характеристик из экспериментальной плотности распределения [3, 5].

Получить экспериментальную плотность распределения можно в результате исследования агрегатов автомобилей с разным техническим состоянием. В любой произвольной группе большинство автомобилей имеют технически исправное состояние и меньшее количество – технически неисправные автомобили. Исправные автомобили окажут влияние на модальное значение оценочного параметра, а неисправные – на математическое ожидание и дисперсию, т.к. именно от этих параметров будет зависеть характер закона распределения. Кривая экспериментального распределения, построенная с исключением больших и малых значений оценочного параметра, являющихся следствием нарушений технического состояния механизма, приближается к нормальному закону распределения. Это обосновано тем, что нормальное распределение является предельным и к нему приближаются другие законы распределения. В таком случае допустимое значение диагностического параметра с доверительной вероятностью 0,95 можно определить по формуле [3]:

$$C_{\text{доп}} = M \pm 2\sigma, \quad (13)$$

где M – модальное значение параметра экспериментальной плотности распределения, построенной без учета больших и малых измерений; σ – среднеква-

дратичное отклонение параметра. Знаки «плюс» или «минус» не равнозначны по смыслу. Они показывают отклонения в сторону увеличения или уменьшения от модального значения в зависимости от характера изменения диагностического параметра.

Результаты исследования и их обсуждение

Техническое состояние карьерных автосамосвалов можно оценить индексом качества масла $I_{\text{КМ}}$ непосредственно по экспериментальной плотности распределения, полученной в результате исследований группы однотипных машин с разным техническим состоянием. Для получения диагностической информации в условиях автотранспортных предприятий Кузбасса выполнялся массовый отбор проб масел из двигателей автосамосвалов марки БелАЗ-7555. Результаты исследований по обобщенным выборкам N группы однотипных машин для моторных масел М-10ДМ и SAE-15W40 представлены в таблице. Здесь MO – математическое ожидание, D – дисперсия, CO – стандартная ошибка среднего значения экспериментальной выборки.

Числовые характеристики распределения диагностического параметра $I_{\text{КМ}}$

Диагностируемые машины	Числовые характеристики						
	N	MO	M	D	σ	CO	$C_{\text{доп}}$
Масло М-10ДМ							
Автосамосвал БелАЗ-7555, двигатель КТТА 19-С	25	0,22	0,2	0,01	0,1	0,02	0,4
Масло Chevron SAE-15W40							
Автосамосвал БелАЗ-7555, двигатель КТТА 19-С	612	0,21	0,20	0,013	0,11	0,005	0,4
Концентрация загрязняющих компонентов в масле Chevron SAE-15W40							
Металлические продукты износа, %	44	0,013	0,005	0,0003	0,016	0,002	0,037

Оценить достоверность диагностирования позволяет сравнение результатов, полученных методом колебательного контура, выраженных через значение $I_{\text{КМ}}$, с результатами стандартного метода ЭСАМ, выраженными через концентрации продуктов износа в масле.

В процессе эксплуатации из двигателей автосамосвалов БелАЗ-7555 выполнялся периодический отбор проб масла на спектральный анализ, где определялась концентрация металлических продуктов износа. Так как предлагаемый к рассмотрению

метод диагностирования не чувствителен к отдельным химическим элементам, характеризующим износ конкретных деталей, то значение $I_{\text{КМ}}$ сравнивалось с суммарной концентрацией металла Me в масле Chevron SAE-15W40 (таблица). Экспериментальная зависимость $I_{\text{КМ}} = f(Me)$ имеет высокий коэффициент корреляции ($r = 0,91$) и выражается уравнением регрессии:

$$I_{\text{КМ}} = 0,07 + 14,87Me - 173,84Me^2. \quad (14)$$

Подставив в уравнение (14) предиктор 0,037 из таблицы, получим:

$$I_{\text{КМ}} = 0,07 + 14,87 \cdot 0,037 - 173,84 \cdot 0,037^2 = 0,38 \approx 0,4.$$

Результат допустимого диагностического параметра, определенного методом ЭСАМ, соответствует допустимому значению диагностического параметра $I_{\text{КМ}}$, определяемого методом колебательного контура, что подтверждает достоверность выполненных исследований.

Выводы

В смазочное масло агрегата автомобиля от нарушения его технического состояния попадают различные загрязняющие компоненты. Эти компоненты характеризуют диагностические признаки, по которым

можно оценить работоспособность агрегата. Загрязняющие компоненты, имея только им присущие диэлектрические свойства, по мере накопления в работающем масле изменяют эффективные диэлектрические свойства масла. Метод колебательного контура по разности частот в зависимости от емкости измерительной ячейки со свежим и работающим маслом способен оценить диэлектрические изменения в смазочной среде. Эти изменения формируют диагностические признаки, которые можно использовать при оценке технического состояния агрегата. Такое теоретическое обоснование позволяет разработать диагностические приборы по схеме колебательного контура, которые способны оценить технические состояния агрегатов машин.

Настоящие исследования на примере карьерного автосамосвала БелАЗ-7555 подтверждают возможность диагностирования двигателя по параметрам работающего масла методом колебательного контура.

Перспективой развития данного метода диагностирования является разработка серии приборов, основанных на описанном выше принципе, позволяющих оценивать агрегаты АТС по параметрам работающего масла любой отраслевой принадлежности.

Работа выполнена по специальности 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта».

Список литературы

1. Майофис И.М. Химия диэлектриков. – М.: Высш. школа, 1970. – 332 с.
2. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 1958. – 896 с.
3. Соколов А.И. Оценка работоспособности машин по параметрам работающего масла / А.И. Соколов, Н.Т. Тищенко, В.А. Аметов. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1991. – 200 с.
4. Способ диагностики агрегатов машин по параметрам работающего масла / Власов Ю.А., Тищенко Н.Т.

и др.: пат. 2473884 Рос. Федерация. № 2011139525/28; заявл. 28.09.2011; опубл. 27.01.2013, Бюл. № 3. – 9 с.

5. Стечкин С.Б., Субботин Ю.Н. Сплайны в вычислительной математике. – М.: Наука, 1976. – 248 с.

6. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.

7. Эме Ф. Диэлектрические измерения. – М.: Химия, 1967. – 224 с.

References

1. Mayofis I.M. *Khimiya dielektrikov* [Chemistry of dielectrics]. Moscow: The higher school, 1970. 332 p.

2. Skanavi G.I. *Fizika dielektrikov* [Physics of dielectrics (area of strong fields)]. Moscow: Publishing house of physical and mathematical literature, 1958. 896 p.

3. Sokolov A.I., Tischenko N.T., Ametov V.A. *Otsenka rabotosposobnosti mashin po parametram rabotayushchego masla* [Assessment of operability of cars on parameters of working oil]. Tomsk: Publishing house of Tomsk University, 1991. 200 p.

4. Vlasov Y.A., Tischenko N.T. *Sposob diagnostiki agregatov mashin po parametram rabotayushchego masla* [Way of diagnostics of units of cars on parameters of working oil]: patent 2473884 Russian Federation. no. 2011139525/28; it is declared 28.09.2011; it is published 27.01.2013. Bulletin № 3. 9 p.

5. Stechkin S.B., Subbotin Yu.N. *Splayny v vychislitel'noy matematike* [Splines in calculus mathematics]. Moscow: Science, 1976. 248 p.

6. Tareev B.M. *Fizika dielektricheskikh materialov* [Physics of dielectric materials]. Moscow: Energoizdat, 1982. 320 p.

7. Aimé F. *Dielektricheskie izmereniya* [Dielectric measurements]. Moscow: Chemistry, 1967. 224 p.

Рецензенты:

Ананин В.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины», декан механико-технологического факультета Томского государственного архитектурно-строительного университета, г. Томск;

Волокитин Г.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная механика и материаловедение» Томского государственного архитектурно-строительного университета, г. Томск.

Работа поступила в редакцию 19.07.2013.