

УДК 621.315

UDC 621.315

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ
ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
ПО ПАРАМЕТРАМ ЧАСТОТНОЙ МОДЕЛИ
ФИЛЬТРА**

**MAINTENANCE OF PERIODICITY
DEFINITION OF INTERNAL COMBUSTION
ENGINE DEPENDING ON THE FREQUENCY
MODEL PARAMETERS OF THE FILTER**

Атрощенко Валерий Александрович
д.т.н., профессор

Atroschenko Valeriy Aleksandrovich
Dr.Sci.Tech., professor

Шевцов Юрий Дмитриевич
д.т.н., профессор

Shevtsov Yuriy Dmitriyevich
Dr.Sci.Tech., professor

Кобзева Светлана Александровна
к.т.н.

Kobzeva Svetlana Aleksandrovna
Cand.Tech.Sci.

Чигликова Надежда Дмитриевна
к.т.н.

Chiglikova Nadezhda Dmitriyevna
Cand.Tech.Sci.

*Кубанский государственный технологический
университет, Краснодар, Россия*

*Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia*

Статья посвящена изучению зависимости частотных характеристик масляного фильтра от состояния системы смазки двигателя внутреннего сгорания. Предложена методика, которая позволяет в динамике отслеживать изменение технического состояния масляного фильтра, моторного масла и двигателя и прогнозировать их остаточный ресурс до момента проведения технического обслуживания

In this article we study connection between frequency characteristics of oil filter and lubricant system condition of internal combustion engine. Method is suggested, it allows to trace changes of technical condition of oil filter, engine oil, engine and to estimate a residual resource of working capacity up to maintenance

Ключевые слова: ДВИГАТЕЛЕЛЬ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, МАСЛЯНЫЙ
ФИЛЬТР, ПЕРИОДИЧНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ, ЗАКОНЫ ФИЛЬТРОВАНИЯ,
ЧАСТОТНАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРА

Keywords: INTERNAL COMBUSTION ENGINE,
OIL FILTER, MAINTENANCE PERIODICITY,
FILTERING LAWS, FREQUENCY MODEL OF
FILTER

При переходе на техническое обслуживание (ТО) по фактическому техническому состоянию элементов системы смазки и двигателя в целом необходимо использовать эффективные способы оценки технического состояния, диагностики и прогнозирования остаточного ресурса элементов системы смазки и двигателя в целом. Для этого при определении периодичности не достаточно учитывать только динамику изменения показателей физико-химических свойств моторного масла и степень загрязнения масляного фильтра. Авторами была разработана методика [1, 2] по которой для назначения времени или определения периодичности технического обслуживания элементов системы смазки по его

фактическому техническому состоянию необходимо одновременно в комплексе определять концентрацию, качественный, химический и дисперсный состав и динамику изменения концентрации примесей в масле $X = f(t)$, динамику изменения производительности (скорости) фильтрования масла фильтром $W_{\phi} = f(t)$ и динамику изменения гидравлического сопротивления фильтра $Z_{\phi}(\tau_{\phi}, R_{\phi}) = f(t)$.

Разработанная методика позволяет на основе полученных экспериментальным и аналитическим путем зависимостей и по построенным по ним графикам определить величину максимальной производительности любого типа фильтра $W_{\phi_{max}}$, и последующего его снижения ее до величины $0,99W_{\phi_{max}}$, найти соответствующую ей величину гидравлического сопротивления фильтра (τ_{ϕ_2} и R_{ϕ_2}), рассчитать период работы фильтра τ , необходимый для ее достижения, который и будет периодом времени, определяющим по фактическому техническому состоянию необходимость проведения технического обслуживания по замене фильтра и масла [1].

Динамика изменения и величина производительности фильтра в сочетании с динамикой изменения его гидравлического сопротивления оценит качественный и дисперсный состав и определит законы фильтрования жидкости, а, следовательно, оценит степень исправности двигателя. Предлагаемая методика позволяет определять периодичность обслуживания при любом дисперсном и качественном составе загрязняющих примесей и тонкости очистки фильтра.

К сожалению, определение предлагаемых параметров экспериментальным и аналитическим методом достаточно трудоемко и требует длительных экспериментальных исследований и статистических данных. В связи с этим предлагается эти величины находить путем

отслеживания динамики изменения параметров частотных характеристик модели масляного фильтра.

В основу методического аппарата, предложенного для построения математических моделей систем смазки двигателей и их основных элементов и исследования их гидравлических параметров, положены частотные методы, применяемые в прикладной теории пневмогидравлических цепей, использующих электрическую аналогию элементов [1, 3].

Методика определения необходимых зависимостей в статье рассматривается на примере гидравлической модели масляного фильтра, полученной на основе проведенных экспериментальных исследований в системе смазки шести цилиндрического дизельного двигателя 4ч14/16 с сетчатым масляным фильтром [1, 3].

Полученная модель масляного сетчатого фильтра (рис. 1) состоит из гидравлической схемы замещения, схемы замещения в электрических аналогах, которая учитывает особенности прохождения масла через элементы его конструкции, и аналитических выражений, записанных в виде передаточных функций [1, 2].

$$W_{P\phi}(S) = \frac{\delta\bar{P}_1(S)}{\delta\bar{P}_0(S)}; \quad W_{z\phi}(S) = \frac{\delta\Delta\bar{P}_\phi(S)}{\delta\bar{G}_0(S)}, \quad (1)$$

где $W_{P\phi}(S)$ - передаточная функция по давлению; $W_{z\phi}(S)$ - передаточное сопротивление.

По разработанной методике построения модели для исследуемой конструкции масляного фильтра вид передаточной функций по давлению, выведенной аналитически, путем использования преобразования Лапласа из уравнений, составленных по схеме замещения и вид передаточной функции, полученной на основе экспериментальных исследований, должен быть одинаковым [1, 3].

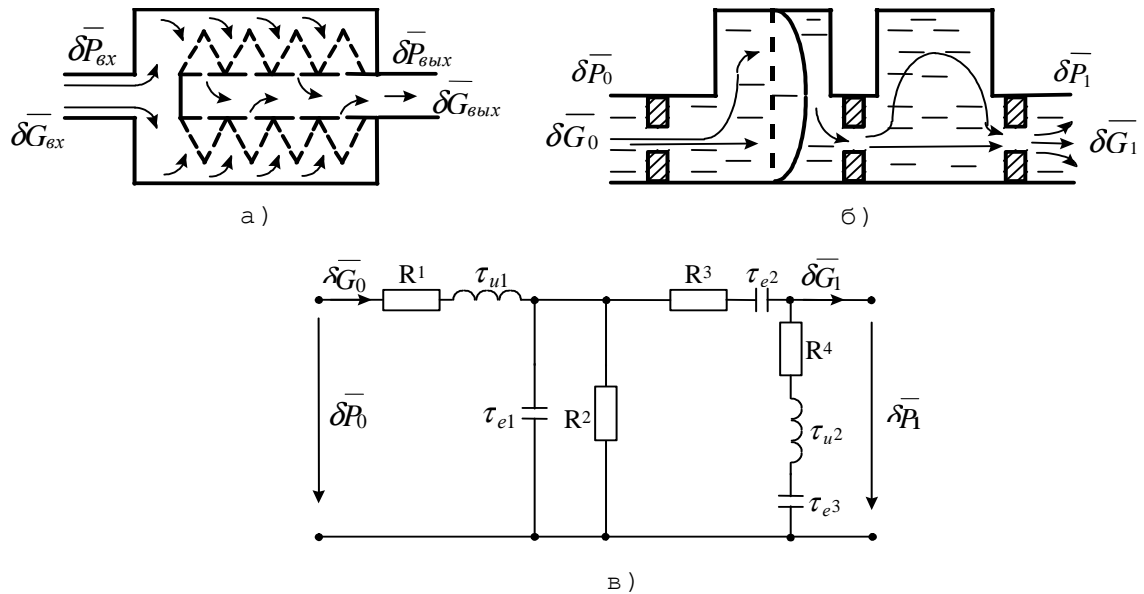


Рисунок 1 – Схемы замещения масляного сетчатого фильтра (а – конструктивная схема; б – гидравлическая схема замещения; в – схема замещения в электрических аналогах.

Для исследуемого типа фильтра передаточная функция по давлению будет иметь вид:

$$W_{\phi_2}(s) = \frac{\delta \bar{p}_1}{\delta \bar{p}_0} = \frac{k(T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1)}{(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)(T_3^2 s^2 + 2\xi_3 T_3 s + 1)} \quad (2)$$

Модуль и аргумент выражения (4) определяют амплитудную и фазовую частотные характеристики масляного фильтра:

$$A_{\phi}(\omega) = \frac{k \sqrt{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + 4 \cdot \xi_2^2 T_2^2 \omega^2}}{\sqrt{(1 - T_1^2 \omega^2)^2 + 4 \cdot \xi_1^2 T_1^2 \omega^2} \cdot \sqrt{(1 - T_3^2 \omega^2)^2 + 4 \cdot \xi_3^2 T_3^2 \omega^2}}; \quad (3)$$

$$\varphi_{\phi}(\omega) = -\arctg \frac{2 \cdot \xi_1 T_1 \omega}{1 - T_1^2 \omega^2} + \arctg \frac{2 \cdot \xi_2 T_2 \omega}{1 - T_2^2 \omega^2} - \arctg \frac{2 \cdot \xi_3 T_3 \omega}{1 - T_3^2 \omega^2}, \quad (4)$$

где:

$$k = \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \text{коэффициент усиления, определяющий перепад давления}$$

на фильтре;

$$T_1 = \sqrt{\frac{R_2 \tau_{u1} \tau_{e1}}{R_1 + R_2}}, T_2 = \sqrt{\tau_{u2} \tau_{e3}}, T_3 = \sqrt{\frac{\tau_{u2} \tau_{e2} \tau_{e3}}{\tau_{e2} + \tau_{e3}}} - \text{постоянные времени;}$$

S - комплексная величина, введенная вместо оператора дифференцирования;

ω – круговая частота;

ξ_1, ξ_2, ξ_3 – коэффициенты демпфирования, определяемы по формуле (5);

$$\xi_1 = \frac{R_1 R_2 \tau_{e1} + \tau_{u1}}{2 \cdot \sqrt{\frac{R_2 \tau_{u1} \tau_{e1}}{R_1 + R_2}}}, \xi_2 = \frac{R_4 \tau_{e3}}{2 \cdot \sqrt{\tau_{u2} \tau_{e3}}}, \xi_3 = \frac{(R_3 + R_4) \tau_{e2} \tau_{e3}}{2 \cdot \sqrt{\frac{\tau_{u2} \tau_{e2} \tau_{e3}}{\tau_{e2} + \tau_{e3}}}} \quad (5)$$

$$R_1 = \frac{\delta \bar{p}_0 - \delta \bar{p}_1}{p} - \text{активная составляющая гидравлического сопротивления}$$

фильтра в безразмерной форме;

$\delta \bar{p}_0, \delta \bar{p}_1$ - амплитуды вариаций давления масла на входе и выходе фильтра;

p – масштабная величина давления;

τ_{u1} - постоянная времени гидравлического сопротивления фильтрующей перегородки, учитывающая инерционность столба жидкости при дросселировании ее через поры фильтроэлемента;

τ_{u2} - постоянная времени гидравлического сопротивления выходной трубки фильтра, учитывающая инерционность столба жидкости в ней;

τ_{e1}, τ_{e3} - постоянные времени гидравлического сопротивления объема жидкости, находящегося в корпусе и выходной трубке фильтра, определяющие упругие свойства жидкости;

τ_{e2} - постоянная времени гидравлического сопротивления объема жидкости, определяемая упругими свойствами фильтроэлемента.

В полученной модели фильтра из выражений (2), (3) и (4) видно, что существует однозначная зависимость коэффициентов k, ξ, T , входящих в

формулы АЧХ и ФЧХ фильтра с постоянными величинами $R_2, R_3, R_4, \tau_{u2}, \tau_{e2}$ и изменяющимися $R_1, \tau_{u1}, \tau_{e1}, \tau_{e3}$ в процессе фильтрования масла значениями составляющих гидравлического сопротивления фильтра:

$$\left. \begin{aligned} A_{\phi}(\omega) &= f(R_1, \tau_{u1}, \tau_{e1}, \tau_{e3}) \\ \varphi_{\phi}(\omega) &= f(R_1, \tau_{u1}, \tau_{e1}, \tau_{e3}) \end{aligned} \right\} (6)$$

Интенсивность увеличения гидравлического сопротивления фильтрующей перегородки при прохождении через нее загрязненного масла, прежде всего, будет зависеть от соотношения размеров пор фильтрующих элементов и размеров частиц загрязнения, т.е. будет зависеть от законов фильтрования.

Наиболее интенсивно растет гидравлическое сопротивление, когда размеры частиц близки к размеру пор и блокируют их. При значительно меньших или больших размерах частиц загрязнения, по отношению к размеру пор фильтрующей перегородки, перепад давления на ней изменяется незначительно. Это связано с тем, что в первом случае, и особенно при отсутствии или малом адсорбирующем эффекте частицы проходят поры, оседая на их внутренних стенках; а во втором - частицы образуют на поверхности перегородки осадок из крупных несжимаемых частиц, также создающих незначительный перепад давления даже при относительно большой толщине осадка, вследствие свободного пространства между отдельными частицами.

По мере загрязнения фильтра, в зависимости от размеров частиц, плотности и толщины слоя отложений на фильтре, а также при изменении дисперсного состава загрязняющих примесей, поступающих в масло и оседающих на фильтрующей поверхности, изменяется не только активная

составляющая его гидравлического сопротивления $R_{\phi}(t) = \frac{\delta \overline{\Delta P_{\phi}}}{\delta \overline{G}}$,

которая пропорциональна перепаду давления на нем $\Delta P = P_{вх} - P_{вых}$, но и динамические составляющие, зависящие от изменения размера фильтрующей ячейки и упругих свойств объема жидкости в корпусе фильтра, которые влияют на параметры k , ξ и T амплитудной и фазовой частотных характеристик масляного фильтра выражения (2) (3) и (4).

Таковыми составляющими являются: $\tau_{u_n}(t) = \frac{l + 2h_{oc}}{F_n}$ - постоянная времени

гидравлического сопротивления фильтра, учитывающая инерционность столба жидкости (масла) при дросселировании ее через одну ячейку

(пору); $\tau_{\epsilon}(t) = \frac{V_{ж} p}{a_{ж}^2 G}$ - постоянная времени гидравлического

сопротивления фильтра, определяемая упругими свойствами объема жидкости в корпусе фильтра [1]. В этих выражениях l - толщина фильтрующей перегородки; h_{oc} - высота осадка загрязнений на фильтрующей ячейке (поре); F_n - площадь отверстия ячейки (поры) фильтроэлемента; $a_{ж}$ - скорость звука в жидкости; $V_{ж}$ - объем жидкости в корпусе.

Упругая (емкостная) составляющая $\tau_{\epsilon}(t)$ остается неизменной, если не изменяются свойства жидкости. Изменение инерционной составляющей гидравлического сопротивления фильтра $\tau_{u_n}(t)$ происходит вследствие увеличения размеров отложений на фильтрующей перегородке фильтроэлемента h_{oc} и уменьшения сечения ячейки (поры) фильтроэлемента F_n (рисунок 2). Толщина слоя отложений на фильтрующей перегородке определяется по формуле:

$$h_{oc} = X \frac{g}{F_n}, \quad (7)$$

где X - концентрация примесей в масле; g - объем жидкости, пропущенный через единицу площади.

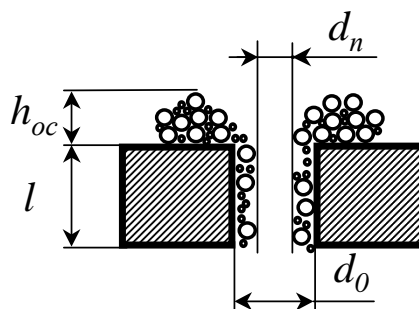


Рисунок 2 – Ячейка фильтроэлемента в период отсева загрязнений из масла.

Площадь сечения пор сетчатого фильтра можно найти из выражения:

$$F_n = \pi d_n^2 / 4,$$

где d_n - диаметр пор, изменяющийся в соответствии с законом фильтрования.

Установлено, что диаметр фильтрующих ячеек в зависимости от места установки фильтра и от закона фильтрования, по которому происходит его загрязнение, изменяется по законам: промежуточный закон (d_1), закон с образованием осадка (d_2), закон постепенного закупоривания пор (d_3), закон полного закупоривания пор (d_4) [1, 3, 4]:

$$\begin{aligned} d_1 &= d_0 e^{-0,25K_1 t}; & d_4 &= d_0 (Q_0 K_4 t + 1)^{-0,25} \\ d_2 &= \frac{1}{\left(\left(\frac{1}{d_0} \right)^{0,5} + \frac{1}{K_2} t \right)^2}; & d_3 &= \frac{d_0 K_3}{K_3 + 4t} \end{aligned} \quad (8),$$

где d_0 и Q_0 - начальные диаметр пор и расход жидкости через фильтр при $t = 0$.

В зависимости от характера протекания режимов трения в трущихся деталях двигателя, протекания рабочего цикла в процессе эксплуатации, т.е. в зависимости от исправного или неисправного, нормального или аварийного состояния двигателя по-разному будут изменяться диаметр отверстия ячейки фильтроэлемента d_n и высота слоя загрязнений h_{oc} , т.е.

законы фильтрования при загрязнении фильтра. При нормальном функционировании двигателя фильтр будет работать по промежуточному закону [1], при возникновении неисправности закон фильтрования изменится. Таким образом, получив закономерности изменения размеров фильтрующих ячеек в процессе эксплуатации для каждого закона фильтрования (выражения 8), с учетом характера изменения концентрации примесей в масле X могут быть получены закономерности (рисунок 3) для изменения инерционной составляющей гидравлического сопротивления фильтра $\tau_{u_n}(t)$.

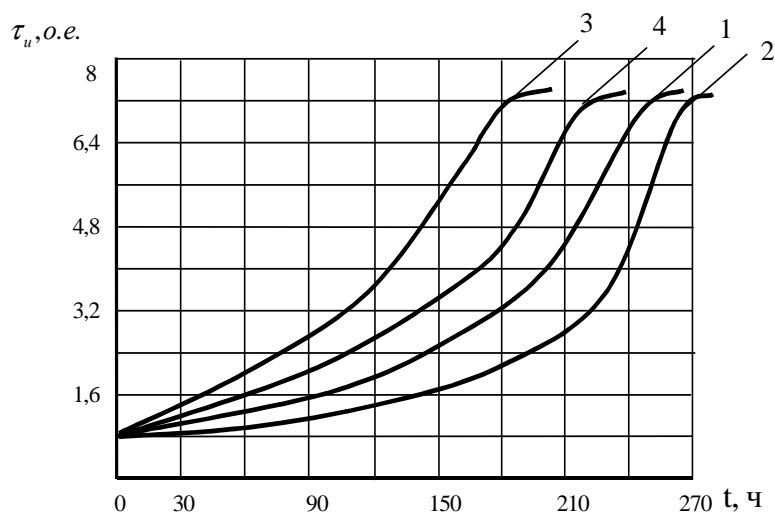


Рисунок 3 - Изменение инерционной составляющей гидравлического сопротивления фильтра в соответствии с законами фильтрования: 1- промежуточный закон; 2-закон постепенного закупоривания пор; 3-закон полного закупоривания пор; 4-закон с образованием осадка.

В результате проведенной серии экспериментов были получены амплитудные и фазовые частотные характеристики фильтра при нормальном функционировании двигателя и с учетом возникновения в нем возможных неисправностей, которые отразились на законах фильтрования. Обработка результатов эксперимента показала, что характер изменения

параметров АЧХ и ФЧХ фильтра для различных законов фильтрования отличаются между собой в широком диапазоне (рисунок 4).

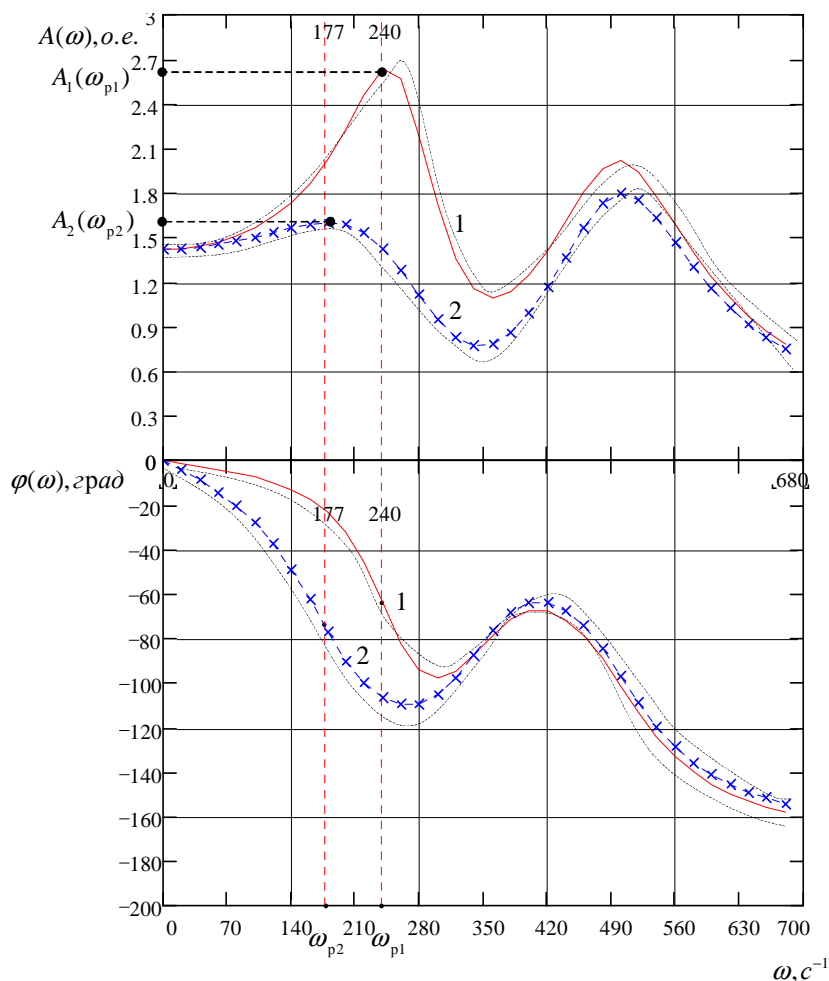


Рисунок 4 – АЧХ и ФЧХ масляного фильтра при $t = 35$ часов: 1 - загрязненного по закону постепенного закупоривания пор; 2 - загрязненного по закону полного закупоривания пор.

Из графиков (рисунок 4) видно, что для одного и того же времени работы фильтра его частотные характеристики имеют различные соотношения амплитуд на резонансных частотах $\omega_p = \omega_0 \sqrt{1 - 2\xi^2}$ и значения резонансных частот на фазах.

При проведении экспериментальных исследований на испытательном стенде с использованием фильтроэлементов,

проработавших в системе смазки весь диапазон эксплуатации до технического обслуживания, были также получены амплитудные частотные характеристики, представленные на рисунке 5.

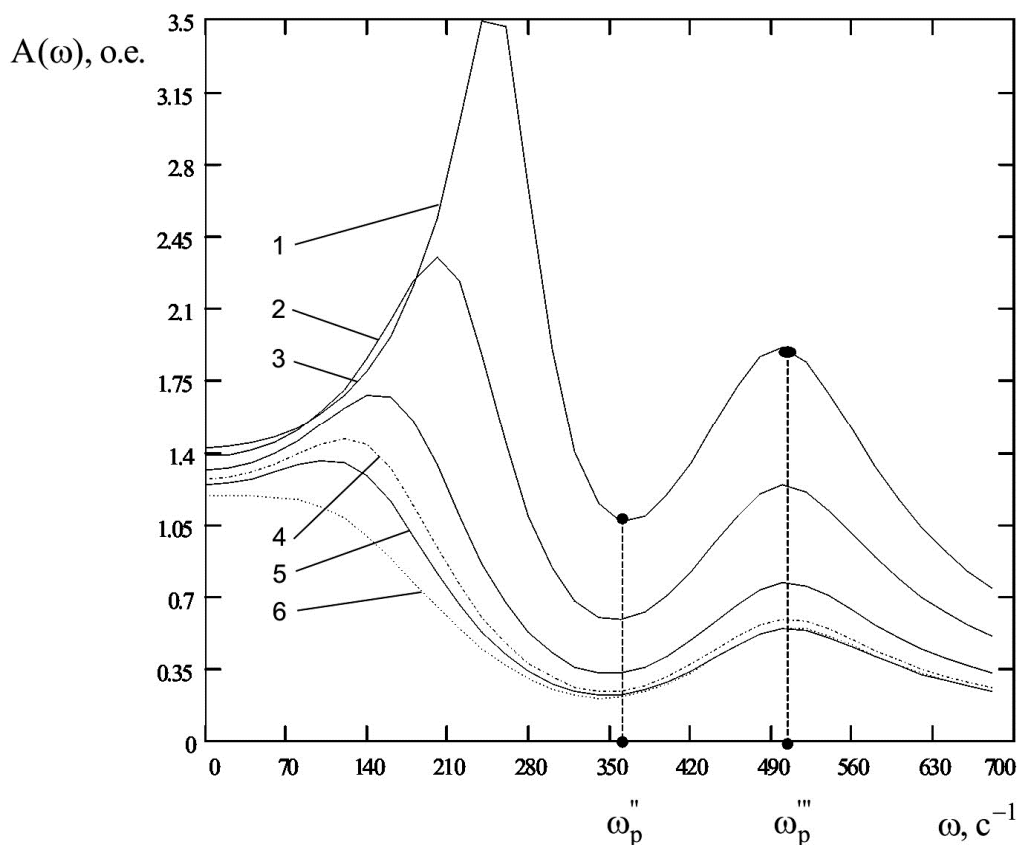


Рисунок 5 – Изменение АЧХ фильтра во всем диапазоне времени эксплуатации до технического обслуживания

Исследования частотных характеристик, полученных при различных законах фильтрования, показало, что от начального периода эксплуатации двигателя или после проведения технического обслуживания и до проведения очередного технического обслуживания по мере загрязнения фильтра величина амплитуды, измеряемая для фиксированной частоты, уменьшается, а скорость изменения по амплитуде и фазе частотных характеристик в контрольных точках времени возрастает и будет иметь свои характеристики для конкретного закона фильтрования (рисунки 4 и 5).

Эти параметры предлагается использовать в качестве диагностических для распознавания закона фильтрования, степени загрязнения фильтра, а, следовательно, и для определения его технического состояния. В связи с этим, определение и отслеживание параметров АЧХ и ФЧХ фильтра во всем диапазоне его эксплуатации позволит точно определить его остаточный ресурс и продолжительность необслуживаемой работы двигателя в целом.

Анализ и исследование полученных для всего диапазона эксплуатации частотных характеристик фильтра (рисунок 5) показал, что до определенного момента эксплуатации оценка изменения гидравлического сопротивления фильтра через одинаковые промежутки времени может достаточно точно осуществляться по параметрам АЧХ (кривые 1, 2, 3). При достижении максимума производительности фильтра $W_{\phi max}$ на последнем этапе его работы значения амплитудных частотных характеристик на отдельных резонансных частотах (ω_p'' и ω_p''') практически не изменяются со временем работы (кривые 4, 5, 6).

Это связано с тем, что в этот период инерционная составляющая гидравлического сопротивления фильтра τ_u также достигает максимума и остается неизменной (рисунки 4).

Свойство неизменности амплитуды АЧХ на выбранной резонансной частоте предлагается использовать для определения величины сопротивления фильтра $Z_{\phi max}(R_{\phi max}, \tau_{u max})$, соответствующего его максимальной производительности $W_{\phi max}$ и последующего вычисления предельно допустимых величин составляющих гидравлического сопротивления его фильтрующих элементов, при снижении максимальной производительности до величины $0,99 W_{\phi max}$, по разработанной ранее методике [2].

Таким образом, для оценки технического состояния двигателя и определения периодичности его технического обслуживания по

параметрам и элементам системы смазки необходимо получить частотные характеристики масляного фильтра за весь период эксплуатации двигателя, определить величину и скорость отклонения по амплитуде и фазе данных характеристик от эталонных АЧХ и ФЧХ и определить его максимальную производительность $W_{\phi max}$. Это может быть реализовано при помощи устройства, разработанного на основе способа оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания по параметрам частотных характеристик масляного фильтра [1]. Устройство представляет собой электронную систему, получающую информацию от датчиков давления, установленных на входе и выходе фильтра, в виде пульсаций давления в масляной магистрали. Амплитудные и фазовые частотные характеристики строятся в заданном диапазоне частот в результате разложения в гармонический ряд этих пульсаций, представляющих собой несинусоидальные периодические сигналы на входе и выходе очистителя масла. Имея подобную информацию, электронная система на основе составленного алгоритма определяет величину максимальной производительности фильтры $W_{\phi max}$ и вычисляет предельно допустимую величину гидравлического сопротивления его фильтрующих элементов.

По величине и скорости отклонения амплитуд и фаз данных характеристик от эталонных АЧХ и ФЧХ определяется техническое состояние двигателя, а по предельно допустимой величине гидравлического сопротивления фильтра определяется периодичность его обслуживания.

Данный алгоритм может быть реализован в устройстве, включенном в бортовую компьютерную систему двигателя, периодически или постоянно отслеживающую параметры измеряемых величин.

Литература:

1. Атрощенко В.А. и др. Технические возможности повышения ресурса автономных электростанций энергетических систем: Монография [Текст] / В.А.

Атрощенко, Ю.Д. Шевцов, П.В. Яцынин, Р.А. Дьяченко, М.Н. Педько – Краснодар: Издательский Дом-Юг, 2010. – 192 с.

2. Определение периодичности технического обслуживания двигателей внутреннего сгорания по максимальной производительности фильтра/ Атрощенко В.А., Шевцов Ю.Д., Кобзева С.А., Горохов Д.А.// Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. - Краснодар: КубГАУ, 2013. - №92(8). - Шифр Информрегистра: 0921308023. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/08/pdf/23.pdf>

3. Шевцов Ю.Д. К вопросу моделирования элементов систем смазки двигателей ДЭС как линейных электрических цепей [Текст] / Ю.Д. Шевцов // Научно-технические ведомости СПб., ГПУ. СЕРИЯ «ИНФОРМАТИКА, ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ, УПРАВЛЕНИЕ». 2010, №5(108) – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010.

4. Жужиков В.А. Фильтрование: Теория и практика разделения суспензий. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Химия, 1980. - 400 с.

References:

1. Atroshhenko V.A. i dr. Tehnicheskie vozmozhnosti povysheniya resursa avtonomnyh jelektrostantsij jenergeticheskikh sistem: Monografija [Tekst] / V.A. Atroshhenko, Ju.D. Shevcov, P.V. Jacynin, R.A. D'jachenko, M.N. Ped'ko – Krasnodar: Izdatel'skij Dom-Jug, 2010. – 192 s.

2. Opredelenie periodichnosti tehničeskogo obslužhivanija dvigatelej vnutrennego sgoranija po maksimal'noj proizvoditel'nosti fil'tra/ Atroshhenko V.A., Shevcov Ju.D., Kobzeva S.A., Gorohov D.A.// Nauchnyj zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs]. - Krasnodar: KubGAU, 2013. - №92(8). - Shifr Informregistra: 0921308023. Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2013/08/pdf/23.pdf>

3. Shevcov Ju.D. K voprosu modelirovanija jelementov sistem smazki dvigatelej DJeS kak linejnyh jelektricheskikh cepej [Tekst] / Ju.D. Shevcov // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPb., GPU. SERIJa «INFORMATIKA, TELEKOMMUNIKACII, UPRAVLENIE». 2010, №5(108) – SPb.: Izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2010.

5. Zhuzhikov V.A. Fil'trovanie: Teorija i praktika razdelenija suspenzij. - 4-e izd., pererab. i dop. - M.: Himija, 1980. - 400 s.