

DOI: 10.18721/JCSTCS.11405
УДК 004.9: 621.4

АЛГОРИТМ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПО ПАРАМЕТРАМ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСЛЯНОГО ФИЛЬТРА

Ю.Д. Шевцов¹, Л.Н. Дудник¹, Ю.В. Чернуха², Е.Д. Фадеев¹, А.М. Никифоров¹

¹ Кубанский государственный технологический университет,
г. Краснодар, Российская Федерация;

² Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко,
г. Краснодар, Российская Федерация

Получены и представлены амплитудные и фазовые частотные характеристики нормально работающего двигателя и с учетом возникновения возможных неисправностей в двигателе. Проведены эксперименты с использованием фильтроэлементов, проработавших в системе смазки различное количество времени. Произведена аппроксимация исходных графиков методом суммы синусов. Предложен алгоритм для проведения диагностики и оценки технического состояния фильтра и технического состояния двигателя. Наличие моделей фильтра, представленных в виде передаточных функций, позволяет, включив их в систему управления двигателем, изменять параметры системы смазки с целью улучшения эффективности его работы.

Ключевые слова: моделирование системы, техническое состояние, состояние фильтра, осциллограммы, управление двигателем, аппроксимация.

Ссылка при цитировании: Шевцов Ю.Д., Дудник Л.Н., Чернуха Ю.В., Фадеев Е.Д., Никифоров А.М. Алгоритм диагностики технического состояния двигателя по параметрам частотных характеристик масляного фильтра // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 4. С. 63–70. DOI: 10.18721/JCSTCS.11405

ALGORITHM FOR DIAGNOSING ENGINE HEALTH BY PARAMETERS OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF OIL FILTER

Yu.D. Shevtsov¹, L.N. Dudnik¹, Yu.V. Chernukha², E.D. Fadeev¹, A.M. Nikiforov¹

¹ Kuban State Technological University,
Krasnodar, Russian Federation;

² Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S.M. Shtemenko,
Krasnodar, Russian Federation

We have obtained and discussed amplitude and phase frequency characteristics of a normally running engine and taking into account possible malfunctions in the engine based on a series of experiments using filter elements working in the lubrication system for different periods of time. Approximation of the initial schedules has been carried out by the sine sum method. We have offered an algorithm for performing diagnostics and assessment of the filter's and the engine's health. Including filter models in the form of transfer functions into the engine's control system allows to change the lubrication system parameters, improving the engine's efficiency.

Keywords: system modeling, technical status, filter health, oscillogram, engine management, approximation.

Citation: Shevtsov Yu.D., Dudnik L.N., Chernukha Yu.V., Fadeev E.D., Nikiforov A.M. Algorithm for diagnosing engine health by parameters of frequency characteristics of oil filter. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 4, Pp. 63–70. DOI: 10.18721/JCSTCS.11405

Введение

Один из важнейших показателей, оценивающих и ограничивающих ресурс непрерывной работы двигателей автономных и резервных энергетически установок, — время необслуживаемой работы элементов системы смазки: ограниченная периодичность замены масляного фильтра и моторного масла*.

Уровень развития современных технологий позволяет создавать системы контроля загрязнения масляного фильтра и элементов системы смазки. Чаще всего такие системы основаны на сравнении показаний датчиков, установленных в ДВС, с эталонными моделями масляных фильтров [1]. Так как пропускная способность фильтра зависит от многих факторов, создание достоверной модели, чувствительной к изменению параметров масляного фильтра, является нетривиальной и очень актуальной задачей. Существует несколько способов ее решения.

К числу наиболее эффективных способов моделирования системы смазки и ее элементов относятся модели, основанные на частотных методах, при помощи которых модели, в частности фильтров, представляются в виде передаточных функций [3–5].

Такие модели позволяют не только эффективно оценивать техническое состояние масляных фильтров, а по ним и двигателей, но и строить систему управления по изменяющимся параметрам системы смазки [2, 6].

Таким образом, для получения постоянной информации о техническом состоянии фильтра и двигателя в целом необходимо установить датчики давления на входе и выходе масляного фильтра, а в бортовом компьютере установить программное обеспечение, позволяющее обрабатывать получаемые осциллограммы давления и сравнивать их с эталонными характеристиками. В процессе эксплуатации могут возникать критические ситуации с параметрами исследуемых характеристик, связанных с «масляным голодани-

ем» на некоторых резонансных частотах. Наличие моделей фильтра, представленных в виде передаточных функций, позволяет, включив их в систему управления двигателя, изменять параметры системы смазки с целью улучшения эффективности его работы.

Результаты проведенного эксперимента

Предлагаемый метод синтеза эталонной математической модели масляного фильтра по исходным данным предполагает наличие экспериментальных графиков, полученных на специальной установке, при помощи которой создавались пульсации давления масла на входе и выходе из фильтра [2]. Экспериментальные графики пульсаций масла в системе смазки двигателя К-770 на одной из частот представлены на рис. 1.

На вход фильтра подавалось давление $P_{\text{вх}}$ пропорционально колебанию

$$y(t) = A_0 \sin \omega_i t, \quad (1)$$

где A_0 — постоянная амплитуда входного сигнала; ω_i — круговая частота, изменяющаяся в процессе эксперимента, на выходе фильтра регистрировался сигнал $P_{\text{вых}}$, пропорциональный

$$x(t) = A_1 \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (2)$$

где A_1 — амплитуда выходного сигнала; φ_i — сдвиг фаз между выходным и входным сигналами.

По результатам обработки полученных осциллограмм определены и построены амплитудные и фазовые частотные характеристики.

Передаточную функцию системы смазки можно получить аналитически, составляя уравнения по их схемам замещения в электрических аналогах [1]. Например, передаточная функция масляного фильтра дизельного двигателя К-770 по давлению, с подставленными в уравнения коэффициентами системы, будет выглядеть следующим образом:

$$W(s) = \frac{8,039 * 10^{-6} s^2 + 1,054 * 10^{-3} s + 0,9804}{3,393 * 10^{-11} s^4 + 9,76 * 10^{-9} s^3 + \dots} \dots \frac{\dots}{+ 1,764 * 10^{-5} s^2 + 1,602 * 10^{-3} s + 1}$$

* Кузнецов Е.С., Болдин А.П., Власов В.М. Техническая эксплуатация автомобилей: Учебник для вузов. 4-е изд. М.: Наука, 2011. 535 с.

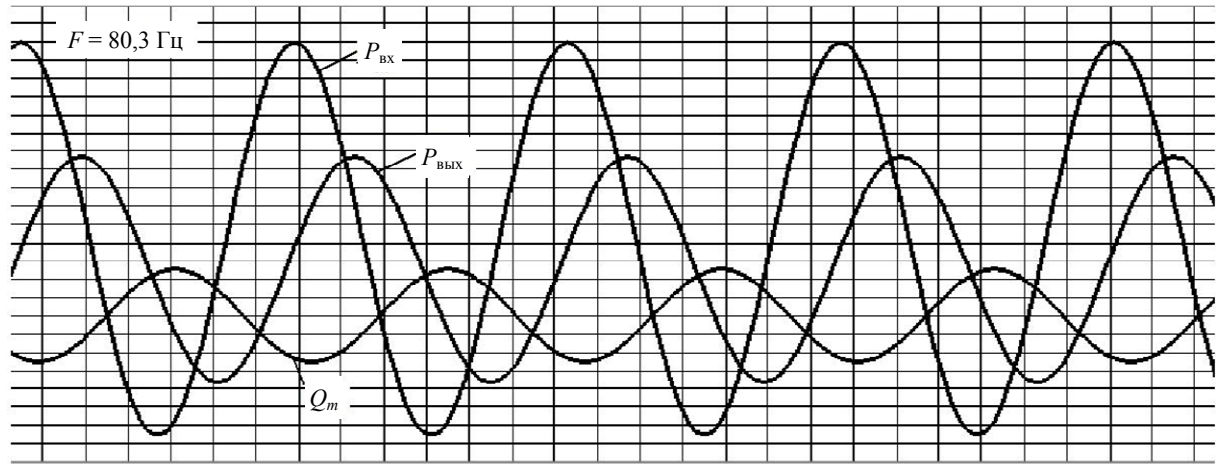


Рис. 1. Осциллограмма давлений масла на входе $P_{вх}$ и $P_{вых}$ фильтра и объемного расхода (подачи) Q_m на одной из частот ($f = 80 \text{ Гц}$)

Fig. 1. Oscillogram of oil pressure at the inlet of the $P_{вх}$ and $P_{вых}$ filter and volumetric flow rate (supply) Q_m at one of the frequencies ($f = 80 \text{ Гц}$)

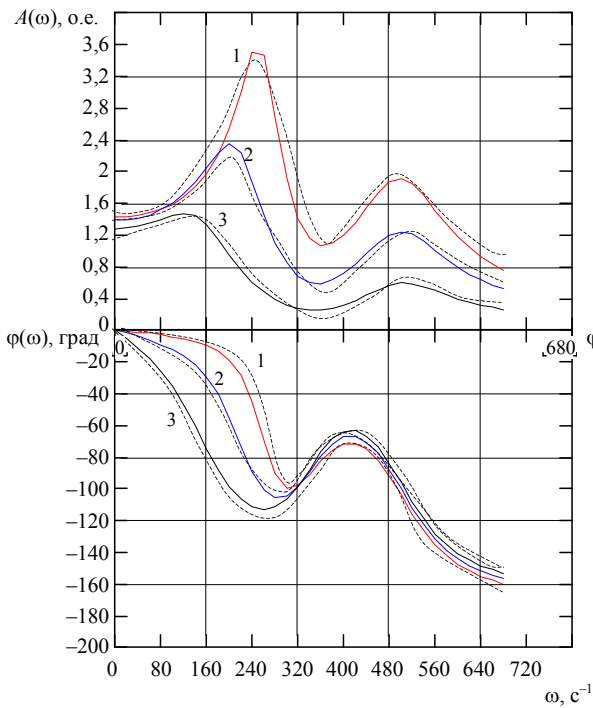


Рис. 2. АЧХ и ФЧХ масляного фильтра при различном времени эксплуатации:

1 – $t = 10 \text{ ч}$; 2 – $t = 80 \text{ ч}$; 3 – $t = 150 \text{ ч}$;
 (- -) теория; (—) эксперимент

Fig. 2. AFC and FCH of the oil filter at different operating times

В результате проведенной серии экспериментов с использованием фильтроэлементов, проработавших в системе смазки различное количество времени, получены и представле-

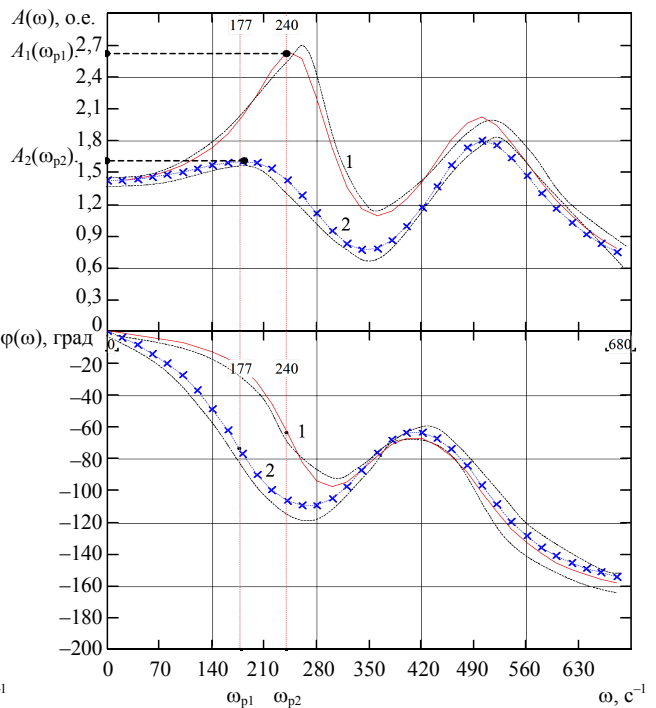


Рис. 3. АЧХ и ФЧХ масляного фильтра при $t = 35 \text{ ч}$:

1 – при нормальной работе двигателя;
 2 – при возникновении неисправности;

Fig. 3. AFC and FCH of the oil filter at $t = 35 \text{ h}$

ны на рис. 2 и 3 амплитудные и фазовые частотные характеристики нормально работающего двигателя и с учетом возникновения возможных неисправностей в двигателе [7].

Другим способом при оценке технического состояния двигателя по параметрам его системы смазки является использование информации, получаемой в результате обработки осциллограмм давления масла, записываемых на входе и выходе фильтра при работающем двигателе (рис. 4).

С этой целью целесообразно применять разработанный способ оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания, согласно которому в качестве параметров пульсаций давления используются амплитудные и фазовые частотные характеристики, получаемые в заданном диапазоне частот в результате разложения в гармонический ряд несинусоидальных периодических сигналов на входе и выходе очистителя масла [2]:

$$P_{\text{вх}}(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i); \quad (3)$$

$$P_{\text{вых}}(t) = \sum_{k=1}^n A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (4)$$

где i, k – гармоники входного и выходного сигналов; A_i, A_k – амплитуды, фазы гармоник входного и выходного сигналов соответственно; n – количество делений среднестатистического периода пульсаций.

В качестве результата определяется величина и скорость отклонения по амплитуде и фазе данных характеристик от эталонных АЧХ и ФЧХ. Эталонными являются частотные характеристики, полученные в результате экспериментальных исследований при нормальной работе двигателя и при возникновении неисправностей в его узлах и системах [8, 9].

Для реализации этого способа предложено воспользоваться программой Matlab. Необходимо произвести аппроксимацию исходных графиков, заданных таблично, методом суммы синусов по семи гармоникам. Описывающее их уравнение представлено ниже:

$$f(x) = \sum_7^i a_i * \sin(b_i * x + c_i), \quad (5)$$

где a_i – амплитудное значение; b_i – круговая частота; c_i – фазы гармоник.

Используя программу Matlab, получаем графики пары вход-выход в электронном виде (рис. 4, 5).

Коэффициенты уравнения аппроксимации для входа по семи гармоникам представлены в табл. 1, для выхода – в табл. 2.

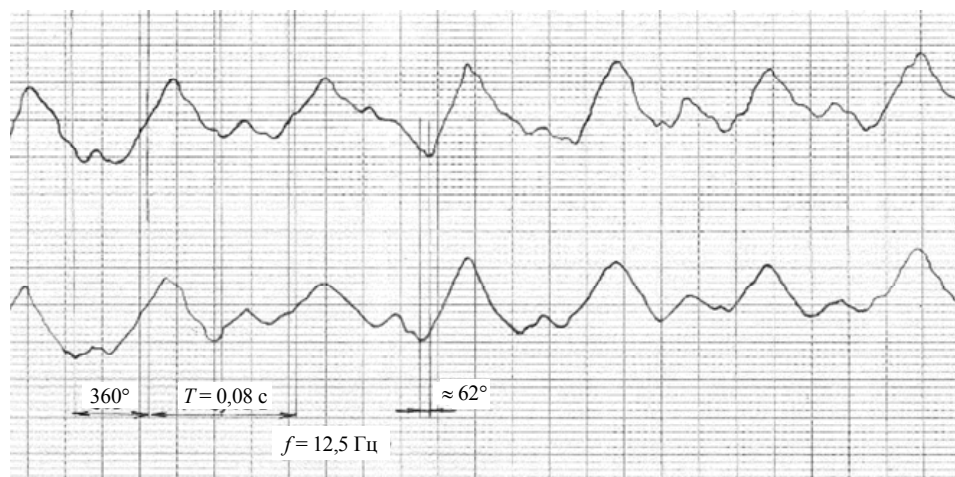


Рис. 4. Осциллограммы давления масла на входе и выходе масляного фильтра при работающем двигателе

Fig. 4. Oscillograms of oil pressure at the inlet and outlet of the oil filter with the engine running

Таблица 1

Коэффициенты уравнения аппроксимации для входа

Table 1

Approximation equation coefficients for an entrance

	1	2	3	4	5	6	7
a	0,5105	0,1109	0,07419	0,02054	0,02802	0,01286	0,007888
b	0,1502	0,3137	0,6411	1,571	1,26	0,9421	1,899
c	0,1036	0,8657	-1,857	1,498	-2,565	1,393	1,842

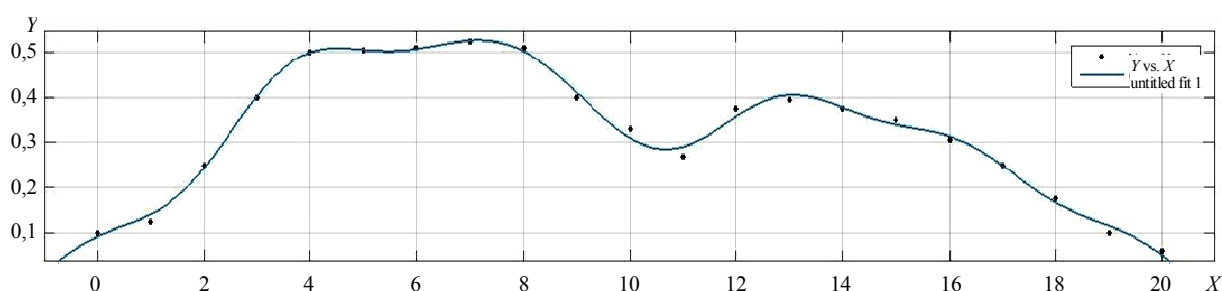


Рис. 4. График аппроксимированной функции на входе:

(•) заданные значения; (—) аппроксимированная функция

Fig. 4. Graph of the approximated function at the input (the specified values are indicated by dots, the approximated function is indicated by a line)

Таблица 2

Коэффициенты уравнения аппроксимации для выхода

Table 2

Approximation equation coefficients for an exit

	1	2	3	4	5	6	7
a_1	0,5503	0,04252	0,02434	0,1548	0,03185	0,01591	0,01019
b_1	0,166	0,6465	1,249	0,3475	0,8113	1,584	2,502
c_1	-0,0578	-2,712	2,299	0,02929	1,662	-0,04344	1,326

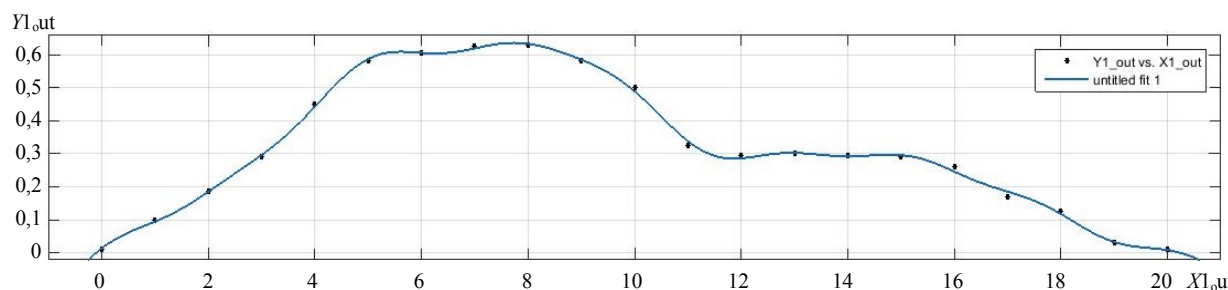


Рис. 5. График аппроксимированной функции на выходе:

(•) заданные значения; (—) аппроксимированная функция

Fig. 5. Graph of the approximated function at the output (the given values are indicated by dots, the approximated function is indicated by a line)

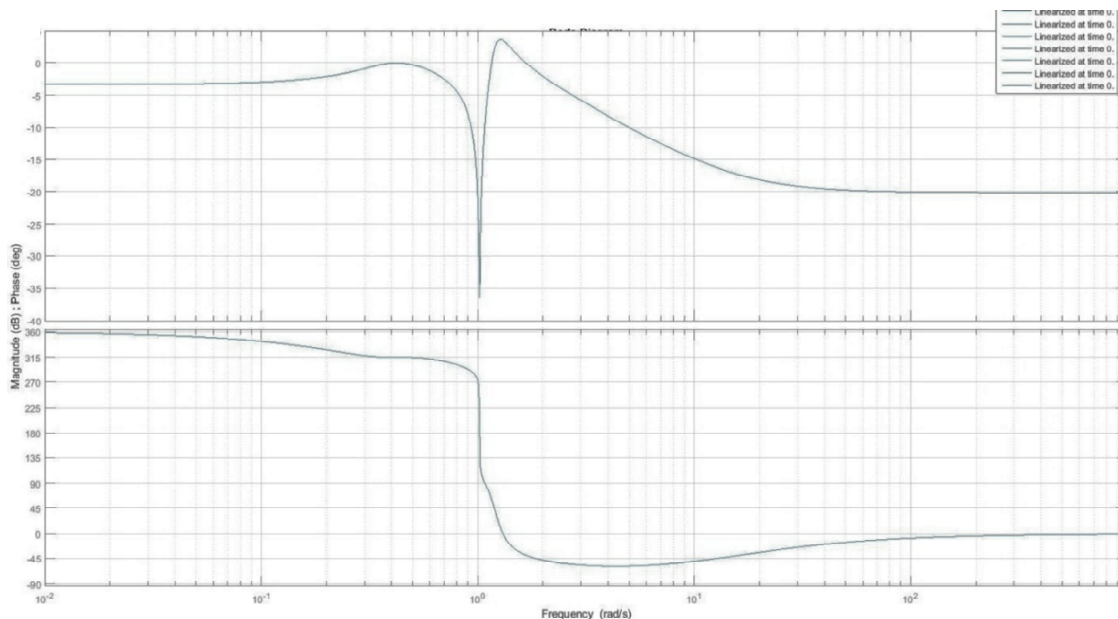


Рис. 6. АЧХ и ФЧХ передаточной функции масляного фильтра

Fig. 6. The AFC and FCH of the transfer function of the oil filter

На следующем этапе формулы, описывающие пульсации масла на входе и выходе из фильтра, преобразуются к виду изображений Лапласа. Отношение изображений Лапласа функций входа и выхода представляет собой математическую модель фильтра в виде передаточной функции:

$$W(s) = \frac{-25,1602 \cdot s^8 - 357,2744 \cdot s^7 + \dots}{-174,4378 \cdot s^8 - 1,6147 \cdot s^7 - \dots} + \frac{383,4296 \cdot s^6 - 597,3089 \cdot s^5 + 495,9023 \cdot s^4 - \dots}{-173,5009 \cdot s^6 + 10,5214 \cdot s^5 + 112,5220 \cdot s^4 - \dots} + \frac{-244,6831 \cdot s^3 + 74,4339 \cdot s^2 - 13,0151 \cdot s - 1}{-98,5891 \cdot s^3 + 42,2884 \cdot s^2 - 9,8241 \cdot s + 1}$$

АЧХ и ФЧХ передаточной функции представлены на рис. 6.

Из сравнения АЧХ и ФЧХ математических моделей, полученных методом схем замещения в электрических аналогах (рис. 4 и 5) и методом получения передаточной функции из аппроксимированных графиков (рис. 6), видно, что они существенно отличаются, поскольку первая получена для фильтра, а вторая учитывает все элементы системы смазки двигателя. Таким образом, передаточная функция всей системы равна $W_c(s) = W_\Phi(s) \cdot W_H(s)$.

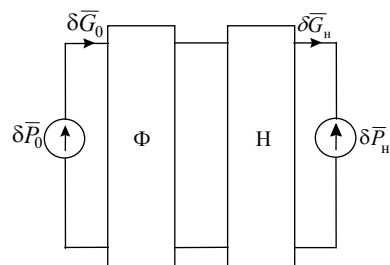


Рис. 7. Структурная схема передаточной функции системы смазки:

Ф – фильтр; Н – нагрузка

Fig. 7. Block diagram of the transfer function of the lubrication system

Она включает в себя передаточную функцию фильтра и передаточные функции остальных элементов системы смазки, представленных в виде передаточной функции нагрузки (рис. 7).

Заключение

Для проведения диагностики и оценки технического состояния фильтра необходимо последовательно реализовать следующий алгоритм.

1. Осциллографировать пульсации давления на входе и выходе фильтра для различных периодов эксплуатации нормального и аварийного функционирования двигателя.

2. Выделить из передаточной функции всей системы смазки $W_c(s)$ передаточную функцию фильтра.

3. Полученные из передаточной функции фильтра частотные характеристики сравнить с эталонными АЧХ и ФЧХ по величине и скорости отклонения амплитуд и фаз этих характеристик.

Таким образом, для получения постоянной информации о техническом состоянии фильтра и двигателя в целом необходимо установить датчики давления на входе и выходе масляного фильтра, а в бортовом ком-

пьютере установить программное обеспечение, позволяющее обрабатывать получаемые осциллограммы давления и сравнивать их с эталонными характеристиками. В процессе эксплуатации могут возникать критические ситуации с параметрами исследуемых характеристик, связанных с «масляным голоданием» на некоторых резонансных частотах. Наличие моделей фильтра, представленных в виде передаточных функций, позволяет, включив их в систему управления двигателя, изменять параметры системы смазки с целью улучшения эффективности его работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ременцов А.Н., Фролов Ю.Н., Воронов В.П. Системы, технологии и организации услуг в автомобильном сервисе. М.: Изд. центр «Академия», 2014. 480 с.

2. Блекборн Дж., Ритхоф Г., Шерер Дж.Л. Гидравлические и пневматические силовые системы управления. Пер. с англ. М.: Изд. ИЛ, 1962. 614 с.

3. Гийон М. Исследования и расчет гидравлических систем. Пер. с фр. М.: Машиностроение, 1964. 387 с.

4. Гликман Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем. М.: Наука. Физматлит, 1986. 386 с.

5. Гликман Б.Ф. Нестационарные течения в пневмогидравлических цепях. М.: Машиностроение, 1979. 256 с.

6. Атрошенко В.А., Шевцов Ю.Д., Яцынин П.В., Дьяченко Р.А., Педько М.Н. Технические воз-

можности повышения ресурса автономных электростанций энергетических систем. Краснодар: ИД «Юг», 2010. 192 с.

7. Григорьев М.А. Очистка масел двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1983. 148 с.

8. Шевцов Ю.Д. К вопросу моделирования элементов систем смазки двигателей ДЭС как линейных электрических цепей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2010. № 5(108). С. 179–182.

9. Атрошенко В.А., Шевцов Ю.Д., Василенко Н.В., Лысенко М.П., Кокорев В.В., Дьяченко Р.А. Способ оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания // Патент РФ на изобретение № 2259549. Бюллетень № 24. 27.08.2005.

Статья поступила в редакцию 09.11.2018.

REFERENCES

1. Rementsov A.N., Frolov Yu.N., Voronov V.P. *Sistemy, tekhnologii i organizatsii uslug v avtomobilnom servise* [Systems, technologies and organization of services in the automotive service]. Moscow: Akademiya Publ., 2014, 480 p. (rus)

2. Blekborn Dzh., Ritkhof G., Sherer Dzh.L. *Gidravlicheskiye i pnevmaticheskiye silovyye sistemy upravleniya* [Hydraulic and pneumatic power control systems]. Moscow: IL Publ., 1962, 614 p. (rus)

3. Giyon M. *Issledovaniya i raschet gidravlicheskikh sistem* [Research and calculation of hydraulic systems]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1964, 387 p. (rus)

4. Glikman B.F. *Matematicheskiye modeli pnevmogidravlicheskikh sistem* [Mathematical models of pneumohydraulic systems]. Moscow: Nauka. Fizmatlit Publ., 1986, 386 p. (rus)

5. Glikman B.F. *Nestatsionarnyye techeniya v pnevmogidravlicheskikh tsepyakh* [Unsteady flows in pneumatichydraulic circuits]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1979, 256 p. (rus)

6. Atroshchenko V.A., Shevtsov Yu.D., Yatsynin P.V., Dyachenko R.A., Pedko M.N. *Tekhnicheskiye vozmozhnosti povysheniya resursa avtonomnykh elektrostantsiy energeticheskikh sistem* [Technical possibilities of increasing the service life of autonomous power stations of energy systems]. Krasnodar: Yug Publ., 2010, 192 p. (rus)

7. Grigoryev M.A. *Ochistka masel dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Purification of internal combustion engine oils]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1983, 148 p. (rus)

8. Shevtsov Yu.D. To the question of modelling of elements of systems of greasing engines des as linear electric chains. *St. Petersburg Polytechnical University*

Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems, 2010, No. 5(108), Pp. 179–182. (rus)

9. **Atroshchenko V.A., Shevtsov Yu.D., Vasilenko N.V., Lysenko M.P., Kokorev V.V., Dyachenko R.A.**

Sposob otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya [The method of assessing the technical condition of the internal combustion engine].

Patent RF No. 2259549, publ. 27.08.2005. (rus)

Received 09.11.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ШЕВЦОВ Юрий Дмитриевич

SHEVTSOV Yuriy D.

E-mail: YuriShud48@gmail.com

ДУДНИК Людмила Николаевна

DUDNIK Lyudmila N.

E-mail: lududnik@mail.ru

ЧЕРНУХА Юрий Владимирович

CHERNUKHA Yuri V.

E-mail: Chernukha@mail.ru

ФАДЕЕВ Евгений Дмитриевич

FADEEV Evgeniy D.

E-mail: fadeev_ed@mail.ru

НИКИФОРОВ Арсений Михайлович

NIKIFOROV Arseny M.

E-mail: nikiforovwork@mail.ru