

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ОЦЕНКИ ИНФОРМАТИВНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ АВТОМОБИЛЯ

Е.А. Пеньков<sup>1</sup>, Р.Ф. Калимуллин<sup>2</sup>

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

<sup>1</sup>e-mail: pea-1i@mail.ru

<sup>2</sup>e-mail: rkalimullin@mail.ru

**Аннотация.** Развитие и усложнение конструкции коробки передач (КП) автомобилей приводит к повышению трудоемкости их обслуживания, поэтому разработка систем диагностирования с высокой автоматизацией, помогающих снизить трудоемкость, является **актуальной** задачей в технической эксплуатации автомобилей. На различных этапах разработки и использования диагностических методов требуется знание об информативности диагностического параметра, как с целью его контроля, так и изменения его величины. На сегодняшний день не сформировано четкое представление об информативности диагностического параметра, и для каждой области применения существует свой подход. Для диагностических параметров, применяющихся в автомобильной диагностике и представляющих собой дискретную периодическую функцию, также трудно найти способ оценки информативности, обладающий необходимыми качествами. Таким образом, разработка нового метода оценки информативности диагностического параметра является актуальной задачей. **Целью** исследования является разработка теоретического подхода к оценке информативности диагностического параметра КП автомобиля.

Существующий подход, базирующийся на определении степени «перекрывания» плотности распределения значений диагностического параметра исправного и неисправного состояния объекта, зачастую, дает некорректные результаты. Базируясь на знаниях структуры диагностического параметра коробки передач автомобиля, имеющую довольно сложный вид и представляющей комплекс функций с аддитивным и мультипликативными свойствами, нами был избран подход, базирующийся на положениях теории информации.

На основании свойства иерархической аддитивности информативность диагностического параметра была представлена как условная энтропия двух совместных событий: получение информативного диагностического параметра и обнаружение дефекта. Проверка работоспособности подхода была осуществлена путем нахождения информативности диагностического параметра, соответствующего трем стадиям развития дефекта, а также оценкой информативности при воздействии на диагностический параметр двумя методами обработки.

Предлагаемый подход к оценке информативности диагностического параметра является дополнением к существующим, покрывая область, где в качестве диагностического параметра используются дискретные периодические функции с аддитивным шумом, имеющие схожие средние значения и стандартные отклонения для различных технических состояний.

**Ключевые слова:** коробка передач, диагностирование, диагностический параметр, информативность, автомобиль.

**Для цитирования:** Пеньков Е. А., Калимуллин Р. Ф. Теоретический подход оценки информативности диагностического параметра коробки передач автомобиля // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 4. – С. 121-128. DOI: 10.25198/2077-7175-2019-4-121.

## THEORETICAL APPROACH OF INFORMATIVITY ASSESSMENT TEST PARAMETER OF CAR TRANSMISSION

Е.А. Penkov<sup>1</sup>, R.F. Kalimullin<sup>2</sup>

Orenburg State University, Orenburg

<sup>1</sup>e-mail: pea-1i@mail.ru

<sup>2</sup>e-mail: rkalimullin@mail.ru

**Abstract.** The development and complication of the design of the car's gearbox leads to an increase the workload, so the development of diagnostic systems with high automation is a necessary direction of development

because it helps to reduce the workload. At different stages of the development and use of the diagnostic methods, knowledge of the informativeness of the test parameter is required. It is necessary to control and change the value of the test parameter. To date, it is difficult to find a way to determine the informativeness for the test parameter of a car transmission. The objective of the study is to develop a theoretical approach to evaluation the informativeness of the gearbox test parameter of the car.

The existing approach, based on the probabilistic characteristics of the diagnostic parameter of the healthy and faulty states, gives incorrect results. We chose an approach based on the theory of information. Based on the hierarchical additivity property, the informativeness of the test parameter was presented as conditional entropy of two compatible events: the receipt of test parameter and the detection of a defect. The efficiency of the approach was tested by finding the informativeness of the test parameter for the three stages of the evolution of the defect and when the test parameter was affected by two processing methods.

The proposed approach to estimating the informativeness of a diagnostic parameter is in addition to the existing ones, covering the area where discrete periodic functions with additive noise, having similar mean values and standard deviations for different technical states, are used as a diagnostic parameter.

**Keywords:** gearbox, technical diagnosis, test parameter, informative value, vehicle.

**Cite as:** Penkov E.A., Kalimullin R.F. (2019) [Theoretical approach to assessing the informative value of the diagnostic parameter of a car's gearbox]. *Intellekt. Innovatsi. Investitsii* [Intellect. Innovation. Investments]. Vol. 4, pp. 121-128. DOI: 10.25198/2077-7175-2019-4-121.

### Введение

Техническое диагностирование представляет ту область эксплуатации автомобильного транспорта, где можно достаточно эффективно внедрять автоматизированные системы, тем самым снижая трудоемкость технического обслуживания объекта. Кроме того, развитие микроэлектронной элементной базы, датчиков и средств программирования позволяет в какой-то степени облегчить процесс внедрения, но все же сложности есть и связаны они в некоторой степени с необходимостью исследования и разработки способов обработки диагностического параметра (ДП). Обобщенно все способы обработки ДП можно разделить на две группы: способы повышения информативности – позволяют подавить аддитивный шум; способы распознавания и прогнозирования – на основе априорных данных сопоставляют между собой ДП и определенный дефект, а также позволяют находить зависимость степени развития дефекта от наработки.

Развитие и усложнение конструкций КП автомобилей приводит к повышению трудоемкости их обслуживания, а устранение отказа требует больших материальных затрат. Поэтому разработка систем диагностирования с высокой степенью автоматизации для снижения трудоемкости и обеспечения приемлемой оперативности получения достоверной информации является актуальной на сегодняшний день [1, 2, 3, 6].

При воздействии на ДП надо контролировать его свойства, одним из важнейших которых является информативность [4]. В настоящей работе используется способ оценки информативности ДП КП автомобиля, в качестве которого выступает виброускорение стенок корпуса КП ( $a$ , м/с<sup>2</sup>). Отметим, что эффективность данного ДП обоснована во многих работах [5, 7, 11–16]. Он несет в себе достаточное

количество информации о дефекте, необходимое для его распознавания и контроля.

### Структура диагностического параметра

В КП большой поток отказов [6] приходится на зубчатые зацепления и подшипниковые узлы. Они, фактически, определяют надежность механизма КП, поэтому в данной работе рассмотрен вопрос диагностирования этих элементов.

Рассмотрим подробнее структуру ДП, имеющую довольно сложный вид, представляющий комплекс функций с аддитивным и мультипликативными свойствами.

Процесс функционирования КП, связанный с преобразованием и передачей крутящего момента, приводит к колебанию его деталей с собственной частотой. Количество энергии, приходящееся на колебание детали, в итоге влияет на амплитуду полученного сигнала с датчика. Появление какого-либо дефекта, сопровождающееся ударным взаимодействием деталей, приводит к резкому увеличению амплитуды сигнала. Математически, принимая данную систему аддитивным можно представить в следующем виде [5]:

$$s(t) = \sum_{i=0}^n a_i e^{-\delta_i t} \sin(\omega_i t + \varphi_i) + m(t) \quad (1)$$

где

$s(t)$  – сигнал, образованный колебаниями элементов механизма и шума;

$a$  – амплитуда колебания;

$\delta$  – коэффициент затухания;

$t$  – время;

$\omega$  – частота собственных колебаний детали;

$m(t)$  – функция аддитивного шума от времени.

$\phi$  – сдвиг фаз периодических функций.

Если представить механизм КП как многоканальную систему связи [5], то отдельный

его элемент можно описать (в векторной форме) следующим образом:

$$S = H^T X + M, \quad (2)$$

где

$S$  – математическая модель элементарной составляющей ДП;

$H^T$  – импульсная характеристика акустического канала;

$X$  – единичный импульс;

$M$  – аддитивный шум.

Модель (2) описывает теоретический вид элементарной составляющей ДП, получаемый с датчика, причем она применима для обоих акустических каналов «подшипник-датчик» и «зубчатое зацепление-датчик». Это обуславливается тем, что при упрощенном понимании они имеют одинаковые физические процессы, т.е. при наличии дефекта происходит ударное взаимодействие деталей, которое представляется в виде единичного импульса. Далее сигнал преобразуется в соответствии с импульсной характеристикой канала и смешивается с шумом. На рисунке 1 представлен графический вид ДП.

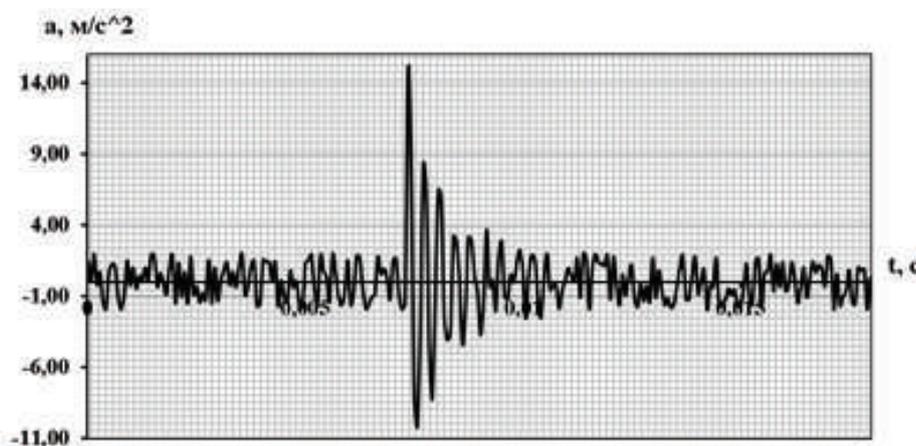


Рисунок 1. Форма сигнала, получаемого от акустического канала

Участок, где имеется затухающая функция, соответствует дефекту, а значения параметров амплитуды, длительности и затухания описывают степень развития дефекта. Значения всех перечисленных параметров и шума влияют на информативность всего ДП.

### Теоретический подход оценки информативности

На сегодняшний день не сформировано четкое представление об информативности ДП, для каждой области применения существует свой подход. Для ДП, используемых в автомобильной диагностике, также трудно найти способ оценки информативности, обладающий универсальностью.

Существует подход, где можно использовать плотности распределения значений ДП исправного и неисправного состояний объекта. Степень «перекрывтия» распределений показала бы нам степень информативности. Но, если рассмотреть два ДП (условно № 1 и № 2) для двух состояний, представляющих собой дискретные функции, то мы можем получить «перекрывтие» распределений (рисунок 2). Представленные ДП отличаются тем, что № 2 принадлежит более развитому дефекту в механизме, чем ДП № 1.

Таким образом, данный подход работает не

всегда и требует принятия дополнительных мер по поиску других характеристик ДП, пригодных для такого метода.

Другой, более фундаментальный подход, основывается на теории информации. Согласно [4], информативность ДП выражает снижение неопределенности о техническом состоянии объекта, представленной априорной энтропией  $H$  после применения информации от данного ДП, измеренного в процессе диагностирования.

ДП, зачастую, должен содержать информацию не только о присутствии дефекта, но и дополнительные характеристики, позволяющие в дальнейшем контролировать эволюцию дефекта. Например, имеется ДП зубчатого зацепления, обработанный методом полосовой фильтрации в диапазоне 1900–2100 Гц (графический вид представлен на рисунке 3). Исходя из этого, мы можем сделать вывод, что имеется дефект с частотой повторения 125 Гц, но мы ничего не можем сказать о других параметрах, таких как энергия, амплитуда, коэффициент затухания функции, характеризующей дефект, и в этом заключается потеря информации. Таким образом, необходима разработка методики, позволяющей работать с ДП, представленной в виде дискретных функций. В данном случае подход, основанный на теории информации, является более подходящим.

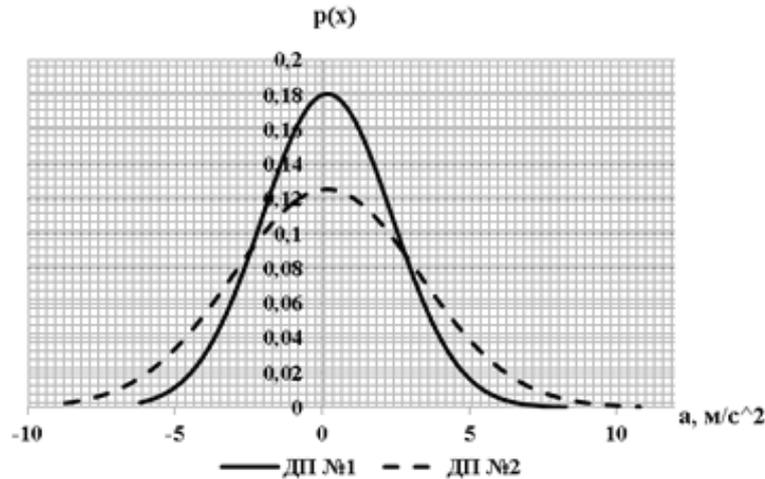


Рисунок 2. Плотности распределения значений ДП

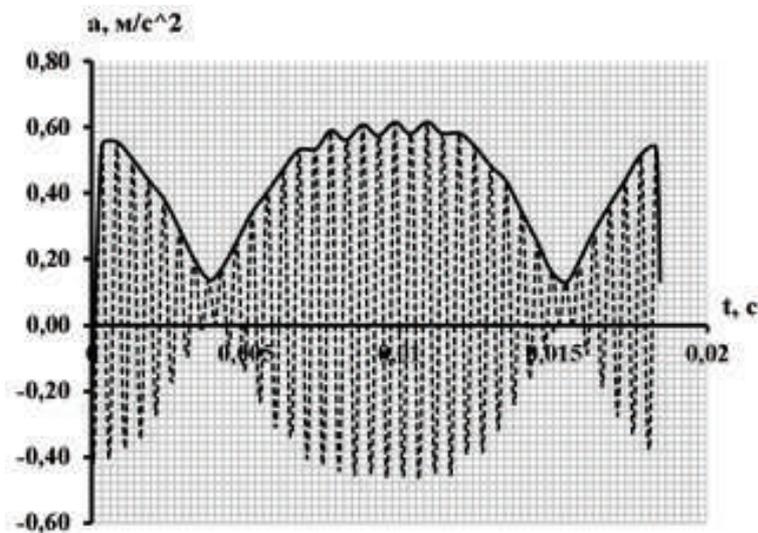


Рисунок 3. Графический вид ДП зубчатого зацепления

На основании свойства иерархической аддитивности [9] представим информативность ДП ( $I_{DP}$ ) как условную энтропию двух совместных событий:  $\Xi_1$  – получение информативного ДП;  $\Xi_2$  – обнаружение дефекта:

$$I_{DP} = \frac{1}{H_{\Xi_1, \Xi_2}} = \frac{1}{H_{\Xi_1} + H_{\Xi_2 | \Xi_1}}, \quad (3)$$

где

$H_{\Xi_1}$  – неопределенность получения информативного ДП;

$H_{\Xi_2 | \Xi_1}$  – неопределенность обнаружения дефекта при наличии информативной функции.

Исходя из выражения определения дискретной энтропии [9]

$$H_{\Xi_1} = -\ln P(\xi_1), \quad (3)$$

где

$P(\xi_j)$  – вероятность получения информативного ДП, мы можем снижать энтропию в целом, повышая вероятность путем воздействия на ДП различными способами его преобразования.

Вычисление априорной вероятности достаточно сложная задача, и если рассматривать ДП различных объектов, то для каждого из них своя вероятность. Причем нет четких зависимостей вероятности обнаружения дефекта от вида ДП, т.к. решение о техническом состоянии принимает диагност на основании своих знаний. Но если сузить задачу, то вопрос стоит в том, чтобы оценить влияние того или иного инструмента повышения информативности ДП в сравнении между собой. Мы не получаем при таком подходе абсолютные численные значения информативности, но понимаем, какое влияние выбранный или вновь разработанный метод оказывает

на ДП. Это важно с точки зрения разработки новых инструментов обработки, для сравнения их и выбора наиболее эффективного.

Предлагаемый способ оценки базируется на понимании того, что получить информацию о дефекте – значит выделить полезный сигнал из общего и сравнить его с эталонным. С математической точки зрения эту процедуру можно описать как получение корреляционной функции для дискретных величин:

$$K = D^T S, \quad (4)$$

где

$K$  – корреляционная функция;  
 $D^T$  – диагностический параметр;

$S$  – функция, описывающая проявление дефекта.

В качестве  $S$  может приниматься функция, графический вид которой представлен на рисунке 1, но без учета шума. Такой сигнал исходит от подшипника при наличии на дорожках качения или элементах качения дефектов типа трещин, раковин, сколов и др.

Рассмотрим три вида корреляционной функции, когда диагностический параметр несет информацию о дефекте в различной степени или отсутствует. Представленные корреляционные функции качественно отражают зависимость степени проявления дефекта в ДП с вероятностью его распознавания. Для количественной оценки был применен коэффициент эксцесса для корреляционных функций, значения для каждого случая указаны на рисунке 4 (б, г, е).

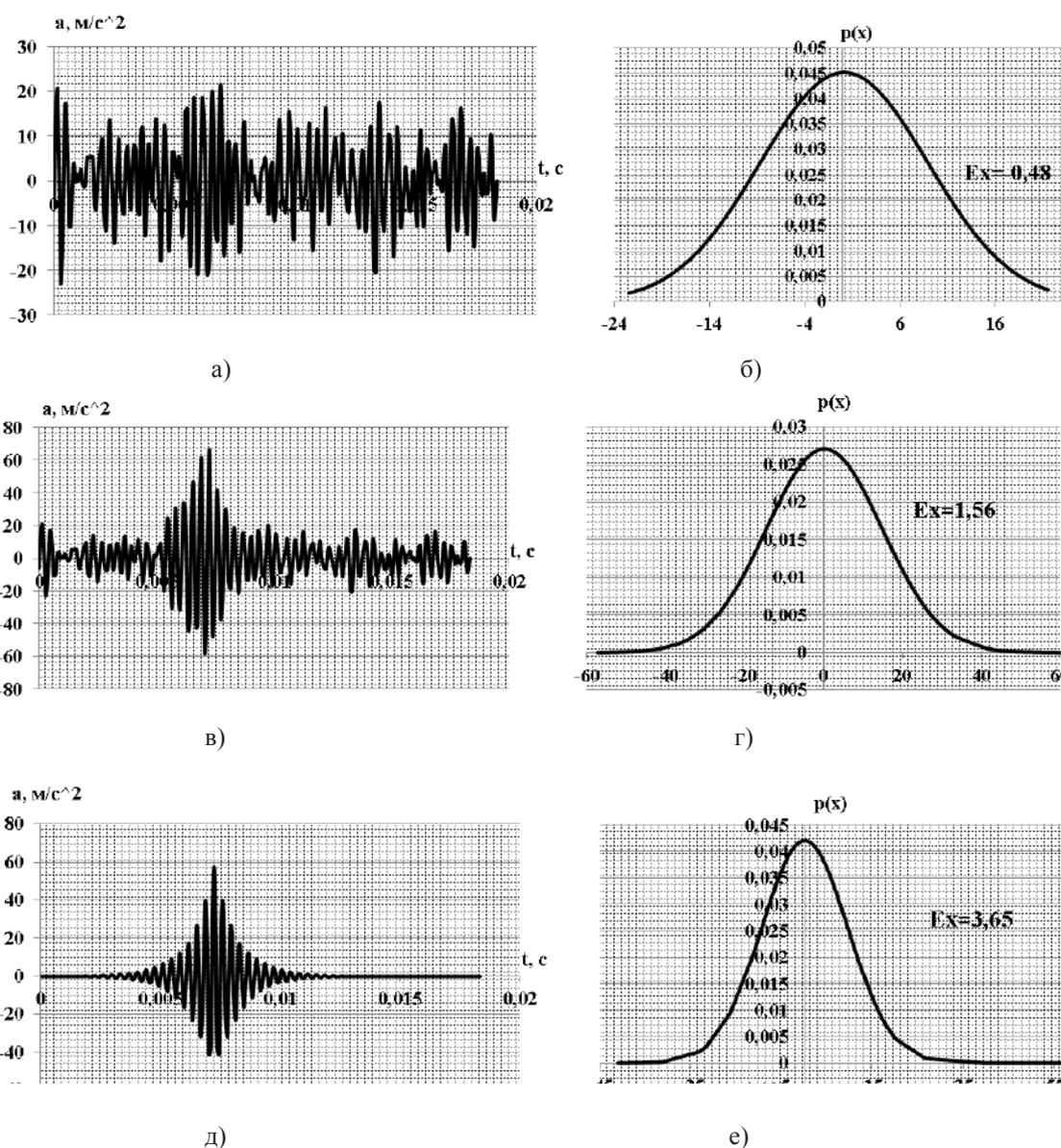


Рисунок 4. Корреляционные функции и функции плотности вероятности (а, в, д – корреляционные функции при отсутствии дефекта, незначительном проявлении и идеальный случай, когда ДП равен ядру КФ; б, г, е –соответствующие корреляционным функциям плотности вероятности)

Из графиков видно, что увеличение априорной вероятности и соответственно повышение информативности ведет к повышению коэффициента эксцесса, т. е. существует закономерность, которую можно представить в следующем виде:

$$P(\xi_1) \xrightarrow{f} E_x \quad (5).$$

Данная функция является возрастающей, а вероятность максимальна, когда максимален эксцесс, что подтверждается результатами исследований. Закон  $f$  при необходимости можно получить для конкретного случая.

Также сравним влияние обработки ДП на его информативность с помощью предлагаемой методики. В качестве одной из методик примем полосовую фильтрацию достаточно сильно зашумленного ДП (графический вид результата обработки представлен на рисунке 3), а другой – адаптивную фильтрацию для того же ДП [8, 10].

На рисунке 5 изображены графики полученных корреляционных функций. При обработке полосовым фильтром значение эксцесса составило 0,37, а при обработке адаптивным фильтром 3,68, что подтверждает эффективность второго метода, который был ранее сравнен с другими методами [6].

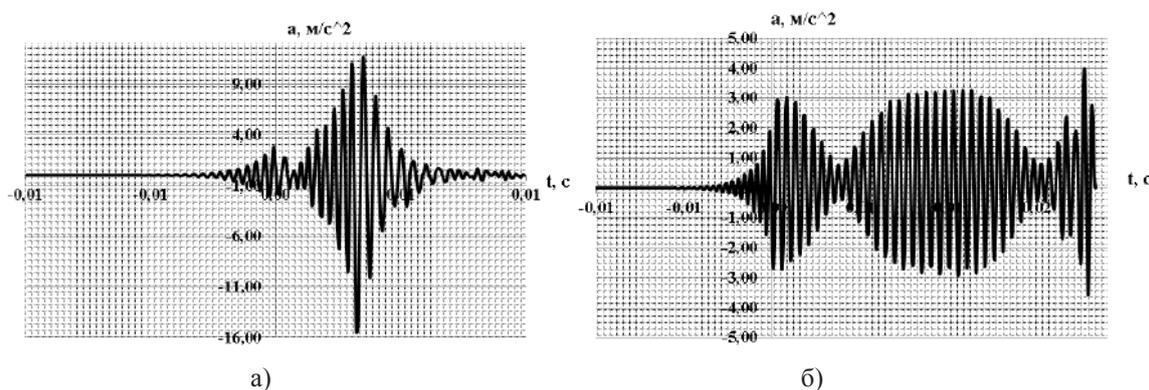


Рисунок 5. Корреляционные функции при обработке различными фильтрами (а – корреляционная функция при обработке адаптивным фильтром; б – корреляционная функция при обработке полосовым фильтром)

### Заключение

Предлагаемый теоретический подход к оценке информативности ДП является дополнением к существующим, покрывая область, где в качестве ДП используются дискретные периодические функции с аддитивным шумом, имеющие схожие средние значения и стандартные отклонения для различных технических состояний. Использование данного подхода позволяет:

- давать качественную и количественную оценку для ДП, представленных в виде дискретных функций;
- сравнить по эффективности различные методы, направленные на повышение качества ДП между собой и с вновь разрабатываемыми;
- показать степень потери информации о дефекте в ДП.

### Литература

1. Гладцын А. Ю. Определение технического состояния коробок переключения передач грузовых автомобилей // Вестник НГИЭИ (Нижегородского государственного инженерно-экономического института). – 2014. – № 10 (41) – С. 50-53.
2. Долотов А. А. Математическая модель расчета звукоизлучения коробки переключения передач автомобилей семейства ГАЗ 3110, 31105 / А. А. Долотов, А. В. Победин, Н. С. Соколов-Добрев, К. О. Долгов // Известия ВолгГТУ. – 2010. – № 3 – С. 29-33.
3. Лянденбургский В. В. Встроенная система диагностирования коробки передач автомобилей / В. В. Лянденбургский, М. В. Нефедов, В. Н. Боровков // Интернет-журнал «Науковедение». – 2014. – № 5 (24). – С. 1-11.
4. Мирошников Л. В. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях. – М.: Транспорт, 1977. – 263 с.
5. Павлов Б. В. Акустическая диагностика механизмов. – М.: Машиностроение, 1971. – 224 с.
6. Пеньков Е. А. Обоснование разработки комплексного метода диагностирования узлов трансмиссии автомобиля / Е. А. Пеньков, Р. Ф. Калимуллин, И. Т. Ковриков // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 10 (52) – С. 104-108.

7. Пеньков Е. А., Калимуллин Р. Ф. Анализ сигнала вибрации от коробки передач автомобиля // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы Международной. научно-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 22-23 декаб. 2017 г. – Тюмень: ТИУ, 2018. – С. 242-246.
8. Сергиенко А. Б. Алгоритмы адаптивной фильтрации: особенности реализации в Matlab // EXPONENTA PRO: Математика в приложениях. – 2003. – № 1. – С. 18-28.
9. Стратонович Р. Л. Теория информации. – М.: Сов. радио, 1975. – 424 с.
10. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.
11. CHATURVEDI, G.K., THOMAS, D.W. (1981) Adaptive noise cancelling and condition monitoring. *Journal of Sound and Vibration*, 76 (3), pp. 391-405.
12. HAIPING LI, JIANMIN ZHAO, XINGHUI ZHANG, HONGZHI TENG (2014) Gear Crack Level Classification Based on EMD and EDT. *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2015, 10 pages.
13. HONGMEI LIU, XUAN WANG, CHEN LU (2015) Rolling bearing fault diagnosis based on LCD-TEO and multifractal detrended fluctuation analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 60-61, pp. 273-288.
14. LI, Y.B., XU, M.Q., WANG, R., HUANG, W.H. (2016) A fault diagnosis scheme for rolling bearing based on local mean decomposition and improved multiscale fuzzy entropy. *Journal of Sound and Vibration*, 360, pp. 277-299.
15. LI, Y.B., XU, M.Q., Yu Wei, HUANG, W.H. (2016) A new rolling bearing fault diagnosis method based on multiscale permutation entropy and improved support vector machine based binary tree. *Measurement*, 77, pp. 80-94.
16. Reza Golafshan, Kenan Y. Sanliturk, (2016) Rolling bearing fault diagnosis using recursive autocorrelation and autoregressive analyses. In: *23<sup>rd</sup> International Congress on Sound & Vibration. Athens, 10 – 14 July*. 8 pages.

#### References

1. Gladtsyn, A.Y. (2014) [The definition of a technical condition boxesgear trucks]. *Vestnik NGIEHI (Nizhegorodskogogosudarstvennogoinzhenerno-ehkonomicheskogoinstituta)* [Herald of Nizhny Novgorod State Engineering and Economic Institute]. Vol. 10 (41), pp. 50-53.(In Russ.)
2. Dolotov, A.A., Pobedin, A.V., Sokolov-Dobrev, N.S., Dolgov, K.O. (2010) [Mathematical model for the calculation of the sound emission of the gearshift box of cars of the GAZ 3110, 31105 family]. *Izvestiya volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Journal Volgograd state technical university]. Vol. 3, pp. 29-33. (In Russ.)
3. Lyandenburskij, V.V., Nefedov, M.V., Borovkov, V.N. (2014) [Built-in system for diagnosing the gearbox of cars]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»* [Internet journal «Science»]. Vol. 5 (24), pp. 1-11. (In Russ.)
4. Miroshnikov, L.V. (1977) *Diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobilej na avtotransportnyh predpriyatiyah* [Diagnosing the technical condition of vehicles at motor transport enterprises]. Moscow: «Transport», 263 p.
5. Pavlov, B.V. (1971) *Akusticheskaya diagnostika mekhanizmov* [Acoustic diagnostics of mechanisms]. Moscow: «Engineering», 224 p.
6. Pen'kov, E.A., Kalimullin, R.F., Kovrikov, I.T. (2016) [Rationale for the development of complex method of diagnosing a parts transmission a car]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* [International Research Journal]. Vol. 10 (52), pp. 104-108.(In Russ.)
7. Pen'kov, E.A., Kalimullin, R.F. (2017) [Analysis of the vibration signal from the car's gearbox] *Problemy funkcionirovaniya sistem transporta: materialy Mezhdunarodnoj. nauchno-praktich. konf. studentov, aspirantov I molodyh uchenyh* [Problems of transport systems: materials of the International. scientific and practical conf. students, graduate students and young scientists]. Tyumen: TIU., pp. 242-246. (In Russ.)
8. Sergienko, A.B. (2003) [Adaptive filtering algorithms: implementation features in Matlab]. *EXPONENTA PRO: Matematika v prilozheniyah* [EXPONENTA PRO: Mathematics in Applications]. Vol. 1, pp. 18-23.(In Russ.)
9. Stratonovich, R.L. (1975) *Teoriya informacii* [Information theory]. Moscow: «Radio and communication», 424 p.
10. Widrow, B., Stearns, C. (1989) *Adaptivnaya obrabotka signalov* [Adaptive Signal Processing]. Moscow: «Radio and communication», 440 p.
11. CHATURVEDI, G.K., THOMAS, D.W. (1981) Adaptive noise cancelling and condition monitoring. *Journal of Sound and Vibration*, 76(3), pp. 391 – 405. (In Engl.)
12. HAIPING, LI, JIANMIN ZHAO, XINGHUI ZHANG, HONGZHI TENG (2014) Gear Crack Level Classification Based on EMD and EDT. *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2015, 10 p.
13. HONGMEI LIU, XUAN WANG, CHEN LU (2015) Rolling bearing fault diagnosis based on LCD-TEO

and multifractal detrended fluctuation analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 60–61, pp. 273–288.

14. LI, Y.B., XU, M.Q., WANG, R., HUANG, W.H. (2016) A fault diagnosis scheme for rolling bearing based on local mean decomposition and improved multiscale fuzzy entropy. *Journal of Sound and Vibration*, 360, pp. 277 - 299.

15. LI, Y.B., XU, M.Q., Yu Wei, HUANG, W.H. (2016) A new rolling bearing fault diagnosis method based on multiscale permutation entropy and improved support vector machine based binary tree. *Measurement*, 77, pp. 80-94.

16. Reza Golafshan, Kenan Y. Sanliturk, (2016) Rolling bearing fault diagnosis using recursive autocorrelation and autoregressive analyses. In: *23<sup>rd</sup> International Congress on Sound & Vibration. Athens, 10 -14 July*. 8 pages.

**Информация об авторах:**

Евгений Александрович Пеньков, ведущий документовед отдела диссертационных советов, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

e-mail: pea-li@mail.ru

Руслан Флюрович Калимуллин, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильного транспорта, Оренбургский государственный университет; **ORCID ID:** 0000-0003-4016-2381, **Researcher ID:** E-9031-2015, **Scopus Author ID:** 6602711766; Оренбург, Россия

e-mail: rkalimullin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.03.2019; принята в печать 05.06.2019.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

**Information about the authors:**

**Evgeniy Aleksandrovich Penkov**, document specialist of the department of dissertation councils, Orenburg State University, Orenburg, Russia

e-mail: pea-li@mail.ru

**Ruslan Flyurovich Kalimullin**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the department of automobile transport, Orenburg State University, **ORCID ID:** 0000-0003-4016-2381, **Researcher ID:** E-9031-2015, **Scopus Author ID:** 6602711766, Orenburg, Russia

e-mail: rkalimullin@mail.ru

The paper was submitted: 13.03.2019.

Accepted for publication: 05.06.2019.

The authors have read and approved the final manuscript.