

## ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ АВТОМОБИЛЯ

Е. А. Пеньков<sup>1</sup>, Р. Ф. Калимуллин<sup>2</sup>, В. А. Сологуб<sup>3</sup>

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

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

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

<sup>3</sup>e-mail: v\_arsentich@mail.ru

**Аннотация.** Современные требования к эксплуатации автомобилей обуславливают необходимость в повышении эффективности системы технического обслуживания и ремонта. В этой системе важную роль играет диагностирование, которое дает информацию о техническом состоянии конкретного элемента автомобиля. В свою очередь, объективность результатов диагностирования зависит от качества диагностического параметра. Известно, что диагностический параметр должен соответствовать нескольким требованиям. Важнейшим требованием является информативность, которая показывает снижение неопределенности о техническом состоянии объекта, представленная априорной энтропией после применения информации от данного диагностического параметра, измеренного в процессе диагностирования. На уменьшение информативности сильное влияние оказывает так называемый шум диагностического сигнала, поэтому от него необходимо избавляться в максимальной степени. Существуют методы преобразования диагностического параметра, которые позволяют в разной степени избавиться от шума, или представить в таком виде, при котором облегчается процесс его анализа. Однако, эти методы не позволяют добиться максимальной информативности от диагностического параметра.

В работе рассматривается разработанный авторами способ повышения качества диагностического параметра на основе метода адаптивной фильтрации сигнала (на примере виброускорения).

В ходе исследований диагностического параметра и алгоритма адаптивной фильтрации было установлено, что существует возможность задавать в качестве переменной функцию, которую необходимо обнаружить, а также несколько параметров, которые влияют на качество результата. На основании этого был предложен новый метод выделения полезного сигнала. Результаты работы были проверены на сигнале, имитирующем сигнал от коробки передач автомобиля. Результаты показывают, что метод позволяет получать необходимые знания о дефекте, которые можно использовать при диагностировании.

Разработанный метод позволяет повысить информативность диагностического параметра путем подавления шумовых составляющих. Результаты предлагаемого метода коррелируют с результатами других методов для общих случаев, т.е. когда отношение полезного сигнала и шума таково, что для выявления полезного сигнала не требуется высокая чувствительность метода.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на построение диагностической модели конкретного элемента или алгоритма автоматической идентификации дефекта.

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

**Для цитирования:** Пеньков Е. А., Калимуллин Р. Ф., Сологуб В. А. Повышение информативности диагностического параметра коробки передач автомобиля // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 1. – С. 106–114. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-1-106.

## IMPROVING THE INFORMATION CONTENT OF THE DIAGNOSTIC PARAMETER OF A CAR GEARBOX

E. A. Penkov<sup>1</sup>, R. F. Kalimullin<sup>2</sup>, V. A. Sologub<sup>3</sup>

Orenburg State University, Orenburg, Russia

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

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

<sup>3</sup>e-mail: v\_arsentich@mail.ru

**Abstract.** Modern requirements for the operation of automobiles lead to the need to increase the efficiency of their maintenance, and technical diagnostics play an important role, it provides information on the technical condition of a particular element with minimal resources. In turn, the diagnosis is sensitive to the quality of the

diagnostic parameter, i.e. its information content should be as high as possible. In this regard, the work considers a method for improving the quality of a diagnostic parameter. It is known that a diagnostic parameter must meet several requirements. The most important requirement is informativeness, which shows a decrease in uncertainty about the technical condition of the object, represented by a priori entropy after applying information from this diagnostic parameter, measured during the diagnosis. There are methods for converting a diagnostic parameter that can, to varying degrees, get rid of the noise included in its composition, or present it in such a way that its analysis is facilitated. The work considers the adaptive filtering method and concludes that it has the greatest potential for the effectiveness of improving the quality of the diagnostic parameter.

In the course of studies of the diagnostic parameter and the adaptive filtering algorithm, it was found that it is possible to set the function to be detected as a variable, as well as several parameters that affect the quality of the result. Based on this, a new method for extracting a useful signal was proposed. The results of the work were checked on a signal simulating a signal from a car's gearbox. The results show that the method allows you to obtain the necessary knowledge about the defect, which can be used in the diagnosis.

The developed method allows to increase the information content of the diagnostic parameter by suppressing noise components. The results of the proposed method correlate with the results of other methods for general cases, i.e. when the ratio of the useful signal to noise is such that high sensitivity of the method is not required to identify the useful signal.

Further research can be aimed at building a diagnostic model of a specific element or an algorithm for automatic identification of the defect

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

**Cite as:** Penkov, E. A., Kalimullin, R. F., Sologub, V. A. (2020) [Improving the information content of the diagnostic parameter of a car gearbox]. *Intellect. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 1, pp. 106–114. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-1-106.

## Введение

Современным и перспективным направлением в эксплуатации автомобилей считается техническое обслуживание и ремонт по фактическому состоянию узлов, агрегатов и систем, где максимально используется ресурс деталей и осуществляется своевременная их замена. Без развитого диагностического обеспечения (ДО) данный подход практически нереализуем. Под развитым ДО мы понимаем наличие следующих компонентов: диагностического параметра (ДП), соответствующего определенным требованиям; эффективных методов диагностирования с качественной диагностической моделью, алгоритмом диагностирования и программным обеспечением; средства диагностирования, позволяющее минимизировать трудозатраты на операции измерения ДП, предварительной обработки ДП, распознавания неисправности и др.

Диагностирование коробки передач (КП) автомобиля является актуальной научно-технической задачей, т.к. несвоевременное обнаружение неисправности в ней приводит к дорогостоящему ремонту [1–3, 6]. Среди безразборных методов контроля технического состояния КП наибольшее распространение получила вибродиагностика [4, 6–9, 12, 15, 16]. Так, в сравнении с физико-химическим анализом масла она позволяет дать оценку по каждому элементу КП и выявлять дефекты на ранних стадиях.

В настоящей работе рассматривается способ повышения качества ДП КП. Известно, что ДП должен соответствовать нескольким требованиям. Важнейшим требованием является информатив-

ность, которая показывает снижение неопределенности о техническом состоянии объекта, представленная априорной энтропией после применения информации от данного ДП, измеренного в процессе диагностирования. Уровень контролепригодности современных КП обуславливает наиболее эффективным применение в качестве ДП виброускорение стенок корпуса для диагностирования подшипниковых узлов и зубчатых передач [7–9]. Но и в таком ДП имеются помехи, которые затрудняют его анализ. Однако у нас есть возможность влиять на измеренный ДП, т.е. повысить его качество перед использованием информации, которую он несет, применяя различные методы обработки, снижающие априорную энтропию [10, 11]. Если ДП представляет собой какую-либо функцию, которая содержит полезную часть и шумовую, то существует возможность преобразовать его таким образом, влияя оператором, что результирующая функция  $f_{DP}^*$  будет иметь минимальную шумовую составляющую:

$$f_{DP}^* = A \cdot f_{DP}, \quad (1)$$

где

$A$  – оператор преобразования;

$f_{DP}$  – диагностический параметр, подвергающийся преобразованию.

В данном случае под оператором преобразования понимается алгоритм или совокупность алгоритмов (способов обработки), ставящие в соответствие функции другую функцию.

Разработка таких методов, позволяющих по-

вышать информативность ДП, является одной из важнейших областей технической диагностики [5, 12–16].

#### Анализ диагностического параметра

Как мы выше отметили, важной составляющей метода обработки является способность давать качественные результаты при малом отношении сигнал/шум. Адаптивный фильтр с этой точки зрения

является одним из самых эффективных методов, благодаря наличию перестраиваемого ядра фильтра [17–19].

Схема обработки ДП адаптивным фильтром представлена на рисунке 1. На вход подается ДП  $f_{DP}$ , состоящий из полезного сигнала  $x$  и шума  $n_0$ , который не коррелирован с  $x$ . Также на вход подается сигнал  $n_1$ , коррелированный с  $n_0$ , но не имеющий корреляцию с полезным сигналом.

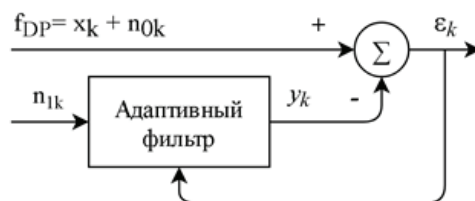


Рисунок 1. Схема обработки ДП адаптивным фильтром

Выход фильтра  $y$  формируется следующим образом [20]:

$$y(k) = \sum_{i=0}^{N-1} h_i(k) n_1(k-i), \quad (2)$$

где

- $k$  – число точек дискретной функции  $y$  и  $n_1$ ;
- $N$  – количество итераций;
- $h_i$  – коэффициент фильтра;
- $i$  – число точек ядра фильтра.

Изменение коэффициентов фильтра производится по формуле [20]:

$$h_{k+1}(i) = h_k(i) + \mu \cdot e(k) n_1(k-i), \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

где  $\mu$  – параметр шага сходимости;  
 $e(k)$  – функция ошибки.

Выходной сигнал, который является функцией ошибки, равен [20]:

$$e(k) = f_{DP}(k) - y(k). \quad (4)$$

Применим адаптивный фильтр к ДП, где в качестве коррелированного сигнала примем импульсную функцию, т.к. априорно мы знаем его вид без точных характеристик. Эта функция подобрана таким образом, что коррелирует с полезным сигналом. В результате обработки в ДП шумовая составляющая максимально подавляется и остается только полезная составляющая. На рисунке 2 представлена функция, полученная после обработки ДП адаптивным фильтром.

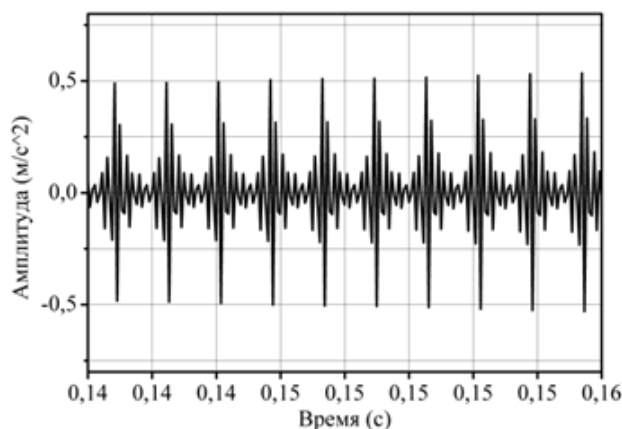


Рисунок 2. Сигнал, полученный после обработки ДП адаптивным фильтром

По мере прохождения каждой итерации происходит подстройка коэффициентов фильтра. Выход-

ная функция позволяет наиболее эффективно оценивать дефект. Но такие качественные результаты

получаются при наличии функции  $n_i$ , максимально коррелирующего с сигналом дефекта, однако на практике мы не имеем такой качественной функции, и применение стандартного алгоритма приводит к некачественным результатам. Результат, который получается при подаче на вход адаптивного фильтра плохо коррелированной функции  $n_i$ , можно наблюдать на рисунке 3.

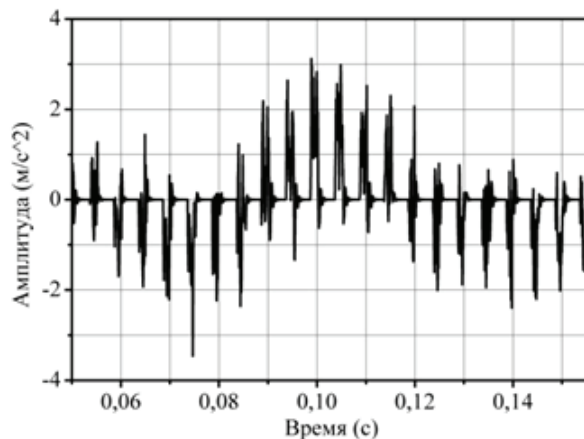


Рисунок 3. Сигнал, полученный после обработки ДП адаптивным фильтром при плохо коррелированной функции  $n_i$

Нами были проведены исследования, в ходе которых были выявлены важные составляющие, сильно влияющие на конечный результат. Рассмотрим первые три, которые непосредственно касаются

Этот сигнал не дает никакой информации о дефекте, в некотором смысле может ввести в заблуждение: мы видим повторяющиеся всплески, которые могут интерпретироваться как ударные импульсы, но на самом деле частота повторения этих импульсов не соответствует действительной частоте, равной 618 Гц.

того, какой вид будет иметь функция  $n_i$  – это частота ее колебаний  $f_s$ , частота повторения импульсов  $f_r$  и сдвиг  $\varphi$  (рисунок 4).

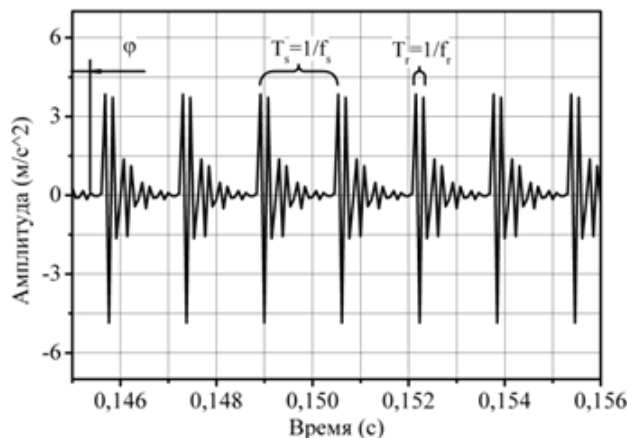


Рисунок 4. Функция  $n_i$ , подаваемая на вход адаптивного фильтра

Рассмотрим влияние каждого из этих параметров на выходной сигнал. Сравнение будем производить с эталонным сигналом, представленным на рисунке 2.

Изменим для функции  $n_i$  последовательно величину параметров  $f_s = 1500$  Гц,  $f_r = 420$  Гц и  $\varphi = 10$  отсчетов. На рисунке 5 можно наблюдать результаты, полученные в ходе обработки.

Во всех случаях отклонение параметров функции  $n_i$  от оптимальных ведет к потере качества сигнала на выходе адаптивного фильтра. Нужно отметить, эти результаты получены с учетом того, что при неоптимальном значении одного параметра остальные принимались оптимальными, иначе результаты получаются крайне малоинформативными.

Рассмотрим еще несколько важных составляющих, влияющих уже на сам алгоритм адаптивной обработки. Известно, что порядок ядра фильтра и параметр шага сходимости также влияют на конечный результат, кроме того влияние оказывает и количество итераций. На рисунке 6а) изо-

бражено изменение  $\varepsilon(k)$  от параметра ядра фильтра ( $N$ ) и величины шага сходимости ( $\mu$ ). Видно, что график функции имеет перепады и локальные максимумы и минимумы, это означает, что выбор этих двух показателей приводит к различным результатам.

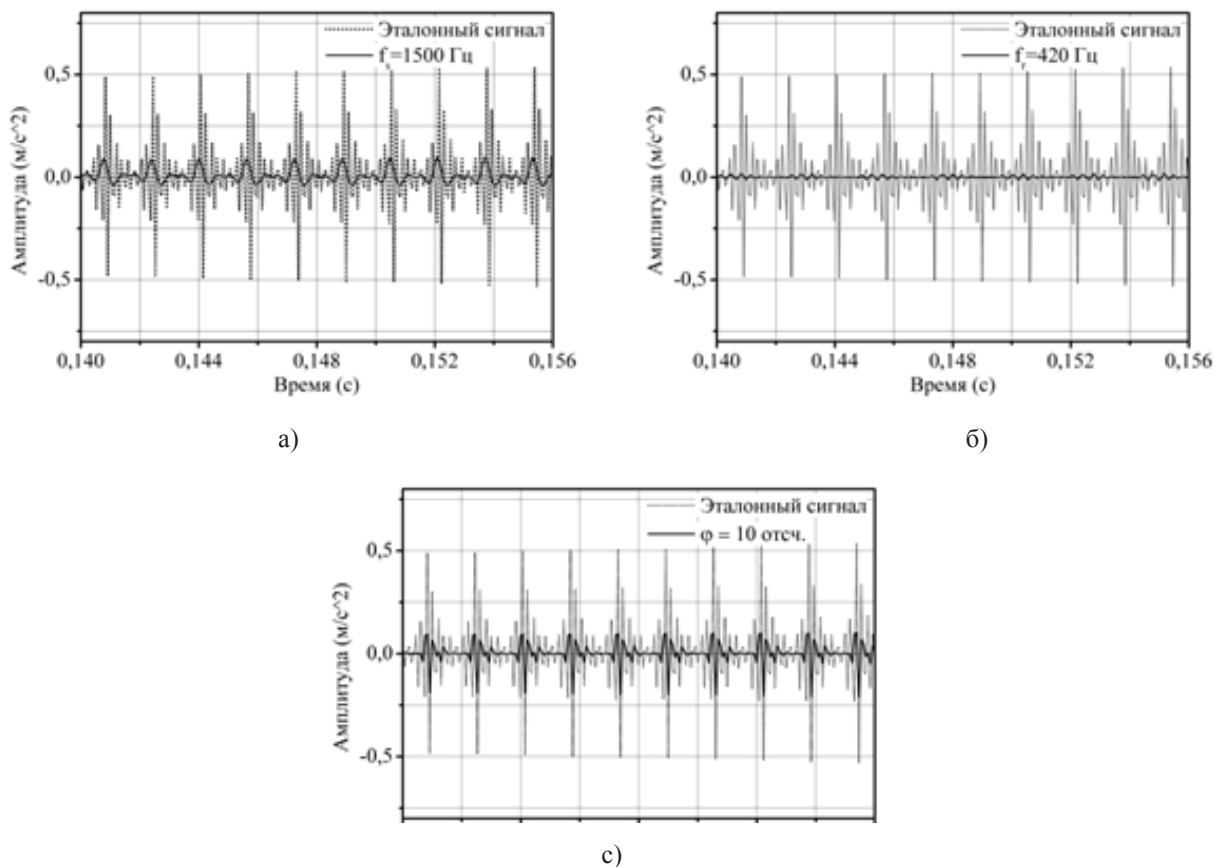


Рисунок 5. Сигналы, полученные при разных значениях параметров функции  $n_1$

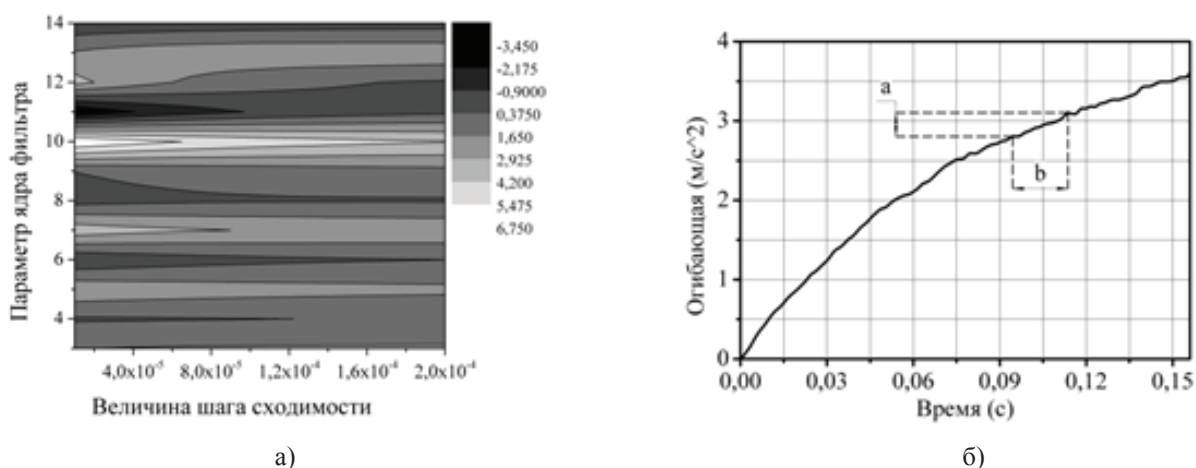


Рисунок 6. График функции  $\varepsilon(k)$  а) и огибающей выходного сигнала б)

Даже при выборе оптимальных значений остальных рассмотренных нами показателей, при

недостаточном количестве итераций выходной сигнал не достигает своего амплитудного максимума,



что можно наблюдать на рисунке 6б). Это означает о необходимости правильного выбора количества итераций ( $n_{iter}$ ).

Исходя из выше изложенного, можно сделать вывод, что адаптивный фильтр является достаточно эффективным инструментом при обработке ДП, но также есть моменты, которые ограничивают его применение. Имеются шесть составляющих (параметров), контролируя которые можно управлять эффективностью адаптивного фильтра.

### Предлагаемый метод обработки диагностического параметра

Итак, мы имеем шесть параметров, от которых зависит выходная функция адаптивного алгоритма обработки ДП, и если рассмотреть обобщенно, то они представляют собой переменные функции

$$f_{DP}^* = \varepsilon = g(f_s, f_r, \varphi, N, \mu, n_{iter}).$$

Так как вышеуказанное отображение является оператором, т.е. на выходе мы получаем функцию, то необходим спо-

соб оценки выходной функции. Особенность этого процесса заключается в том, что выходная функция, по сути, является ДП. Нами было принято решение оценить эту функцию параметром информативности ДП ( $I_{DP}$ ) [21]. Таким образом, мы можем заменить  $\varepsilon$  его оценкой  $I_{DP}$ . В итоге получим следующую целевую функцию:

$$I_{DP} = g(f_s, f_r, \varphi, N, \mu, n_{iter}) \rightarrow \max. \quad (5)$$

Аналитический вид выражения (5) не требуется ввиду того, что все операции на практике выполняются машиной, работающая с дискретными величинами, а сама целевая функция задается таблично.

Решение целевой функции (5) и нахождение оптимального значения ДП основано на формулах (6), (7) и (8). Выражение (6) представляет собой нахождение оптимальных параметров первой группы, выражение (7) включает в себя остальные параметры. Коэффициенты адаптивного фильтра меняются согласно выражению (8).

$$F_S = \begin{bmatrix} (H_0 \otimes S_0) \otimes B \\ (H_1 \otimes S_1) \otimes B \\ \dots \\ (H_i \otimes S_i) \otimes B \end{bmatrix}, \quad F_R = \begin{bmatrix} (H_0 \otimes R_{0FS}) \otimes B \\ (H_1 \otimes R_{1FS}) \otimes B \\ \dots \\ (H_i \otimes R_{iFS}) \otimes B \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$F_\Phi = \begin{bmatrix} (H_0 \otimes \Phi_{0FSFR}) \otimes B \\ (H_1 \otimes \Phi_{1FSFR}) \otimes B \\ \dots \\ (H_i \otimes \Phi_{iFSFR}) \otimes B \end{bmatrix},$$

где

$F_S, F_R, F_\Phi$  – векторы оптимальных параметров;  
 $H$  – вектор коэффициентов фильтра до нахождения оптимальных параметров  $\mu$  и  $N$ ;  
 $S$  – вектор обрабатываемого сигнала;  
 $R_{iFS}$  – вектор обрабатываемого сигнала с оптимальным параметром  $f_s$ ;  
 $\Phi_{iFSFR}$  – вектор обрабатываемого сигнала с оптимальным параметром  $f_s$  и  $f_r$ ;  
 $B$  – вектор для оценки информативности.

$$F_{DP}^* = \begin{bmatrix} W_0 \otimes S_{opt} \\ W_1 \otimes S_{opt} \\ \dots \\ W_i \otimes S_{opt} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$W_{(k+1)i} = W_k + 2M_i e_k N_k, \quad (8)$$

где  $F_{DP}^*$  – вектор диагностического параметра;

$M = [\mu_1 \mu_2 \dots \mu_i]$  – вектор параметра скорости сходимости;

$W$  – вектор коэффициентов фильтра при поиске оптимальных параметров  $\mu$  и  $N$ .

### Результаты

Оценим разработанную методику на примере обработки ДП четырехступенчатой коробки передач автомобиля, где на зубе шестерни третьей передачи имеется трещина. График ДП после обработки представлен на рисунке 7 во временной а) и частотной б) реализации. Он подобен сигналу, который мы могли бы получить при знании всех характеристик функции  $n_i$  (рисунок 2), т.е. максимально коррелирующего с полезным сигналом.

Разработанный алгоритм как раз позволяет найти именно такую функцию  $n_i$ . В данном случае этот сигнал качественнее сигнала, изображенного на рисунке 2, благодаря введению оптимизации по

параметру ядра фильтра и скорости сходимости. Если проанализировать данный ДП, то мы получа-

ем необходимые знания о дефекте, которые можно использовать при диагностировании.

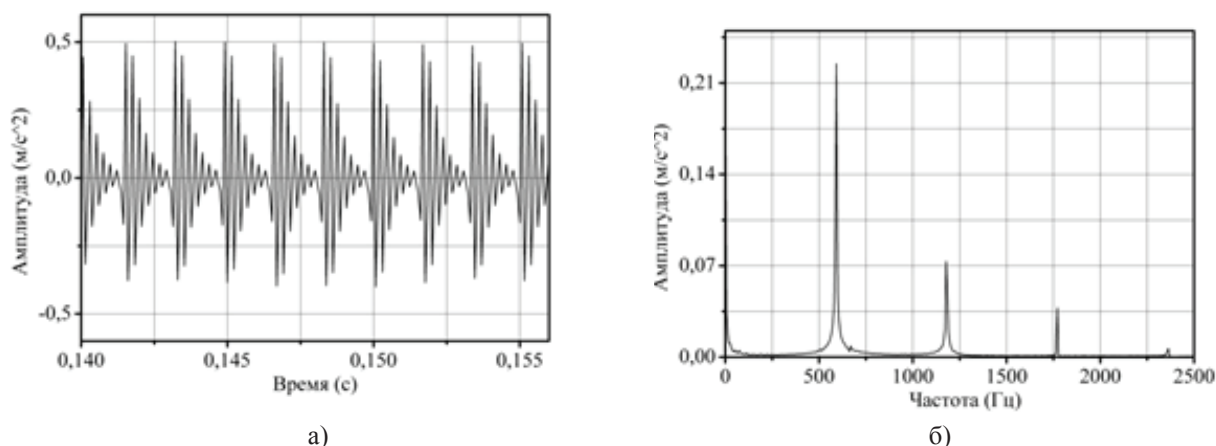


Рисунок 7. Графический вид ДП после обработки разработанным алгоритмом а) и его спектр б)

Результаты предлагаемого метода коррелируют с результатами других методов для общих случаев, т.е. когда отношение полезного сигнала и шума таково, что для выявления полезного сигнала не требуется высокая чувствительность метода.

#### Заключение

Разработанный метод позволяет повысить информативность ДП путем подавления шумовых

составляющих. Ключевыми элементами данного метода является использование адаптивного фильтра с оптимальными параметрами и поиск эффективной функции  $n_j$ .

Дальнейшие исследования могут быть направлены на построение диагностической модели конкретного элемента или алгоритма автоматической идентификации дефекта.

#### Литература

1. Гладцын А. Ю. Определение технического состояния коробки переключения передач грузовых автомобилей // Вестник НГИЭИ. – 2014. – № 10 (41). – С. 50–53.
2. Лянденбургский В. В., Нефедов М. В., Боровков В. Н. Встроенная система диагностирования коробки передач [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Науковедение». – 2014. – № 5(24). – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/vstroennaya-sistema-diaagnostirovaniya-korobki-peredach-avtomobiley> (дата обращения: 21.03.2019).
3. Долотов А. А., Победин А. В., Соколов-Добрев Н. С., Долгов К. О. Математическая модель расчета звукоизлучения коробки переключения передач автомобилей семейства ГАЗ 3110, 31105 // Известия ВолгГТУ. – 2010. – № 3 – С. 29–33.
4. Скворцов А. А. Разработка методики виброакустической диагностики ведущих мостов легковых автомобилей для бортовой системы диагностирования агрегатов трансмиссии: дис. канд. техн. наук: 05.05.03 – Ижевск, 2014. – 153 с.
5. Тананаев Д. Д. Методика выделения из шума сигнала с целью определения эксплуатационного состояния технического объекта // Наука и современность. – 2014. – № 27. – С. 169–173.
6. Лелиовский К. Я. Исследование вибрационных характеристик агрегатов трансмиссий автотракторной техники для совершенствования их конструкции / К. Я. Лелиовский // Вестник НГИЭИ. – 2011. – № 1 (2). – С. 103 – 109.
7. Fanzhao Kong, Wentao Huang, Yunchuan Jiang, Weijie Wang, and Xuezeng Zhao (2018) A Vibration Model of Ball Bearings with a Localized Defect Based on the Hertzian Contact Stress Distribution. *Shock and Vibration*. [Online] Vol. 2018. Available from: <https://doi.org/10.1155/2018/5424875>.
8. Liu, Jing & Shao, Yimin & Zhu, W.. (2015). A New Model for the Relationship Between Vibration Characteristics Caused by the Time-Varying Contact Stiffness of a Deep Groove Ball Bearing and Defect Sizes. *Journal of Tribology*. [Online] 137(3):031101. Available from: DOI: 10.1115/1.4029461.
9. Mishra, Chintamani & Samantaray, Arun & Chakraborty, Goutam. (2017). Ball bearing defect models: A study of simulated and experimental fault signatures. *Journal of Sound and Vibration*. [Online] 400. 86–112. Available from: DOI: 10.1016/j.jsv.2017.04.010.

10. Piltan, Farzin& Kim, Jongmyon. (2019). Nonlinear Extended-state ARX-Laguerre PI Observer Fault Diagnosis of Bearings. *Applied Sciences*. [Online]9. 888. Available from:DOI:10.3390/app9050888.
11. Piltan, Farzin& Kim, Jongmyon. (2018). Bearing Fault Diagnosis by a Robust Higher-Order Super-Twisting Sliding Mode Observer. *Sensors*. [Online]18. 1–22. Available from:DOI:10.3390/s18041128.
12. KeFeng, KeSheng Wang, Mian Zhang, Qing Ni and Ming J Zuo (2017)A diagnostic signal selection scheme forplanetary gearbox vibration monitoringunder non-stationary operational conditions. *Measurement Science and Technology*. [Online] 28 (3). Available from: doi:10.1088/1361-6501/aa543e.
13. Yi-Fan Li, MingJianZuo, KeFeng and Yue-Jian Chen (2017) Detection of Bearing Faults Using a Novel AdaptiveMorphological Update Lifting Wavelet. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. [Post-print]30 (6), pp. 1305–1313. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10033-017-0186-1#citeas>.
14. Yongbo Li, Yu Wei, KeFeng, Xianzhi Wang and Zhenbao Liu (2019) A fault diagnosis method for planetary gearboxes under non-stationary working conditions using improved Vold-Kalman filter and multi-scale sample entropy. *Journal of Sound and Vibration*. [Online] 439. Available from: doi.org/10.1016/j.jsv.2018.09.054.
15. Mian Zhang, KeSheng Wang, Dongdong Wei and Ming J. Zuo (2018) Amplitudes ofcharacteristic frequencies for fault diagnosis ofplanetary gearbox. *Journal of Sound and Vibration*. [Online] 432. Available from: doi.org/10.1016/j.jsv.2018.06.011.
16. Khadem, S. E. and Rezaee, M. (2003) Development of vibration signature analysis using multiwavelet systems. *JSV*. 261 (4). Available from: doi:10.1016/S0022-460X(02)00992-6.
17. Widrow, B. and Stearns, S. D., (1985) *Adaptive Signal Processing*. USA: Prentice Hall.
18. McDonald, G. and Zhao, Q. (2011) Model-based adaptive frequency estimator for gear crack fault detection. *Proceedings of the American Control Conference*. 792–797. 10.1109/ACC.2011.5991553.
19. Chaturvedi, G. K., Thomas, D. W. (1981) Adaptive noise cancelling and condition monitoring. *Journal of Sound and Vibration*. 76(3), pp. 391–405.
20. Ifeachor, I. C. and Jervis, B. W. (1994) *Digital signal processing. Apracticalapproach*. USA: Addison-Wesley.
21. Пеньков Е. А., Калимуллин Р. Ф. Теоретический подход оценки информативностидиагностического параметра коробки передач автомобиля // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 4. – С. 121–128. DOI: 10.25198/2077-7175-2019-4-121.

## References

1. Gladcyn, A. Yu. (2014) [Determination of the technical condition of truck gearboxes]. *Vestnik NGIEI* [Bulletin NGIEI]. Vol. 10 (41), pp. 50–53. (In Russ.).
2. Lyandenburskij, V. V., Nefedov, M. V., Borovkov, V. N. (2014) [Integrated gear diagnosis system]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»* [Internet journal “Naukovedenie”]. Vol. 5(24), pp. 1–11. (In Russ.).
3. Dolotov, A. A., Pobedin, A. V., Sokolov-Dobrev, N. S., Dolgov, K. O. (2010) [The mathematical model for calculating the sound emission of the gearbox of the GAZ 3110, 31105 family cars] *Izvestiya VolgGTU* [Izvestia Volgograd State Technical University]. Vol. 3, pp. 29–33. (In Russ.).
4. Skvortcov, A. A (2014) *Razrabotka metodiki vibroakusticheskoy diagnostiki vedushchih mostov legkovyh avtomobilej dlya bortovoj sistemy diagnostirovaniya agregatov transmissii. Doc. Diss.* [Development of a technique for vibro-acoustic diagnostics of driving axles of cars for an on-board system for diagnosing transmission units. Doc. Diss.]. Izhevsk, 153 p.
5. Tananaev, D. D. (2014) [Methods of isolating a signal from noise in order to determine the operational state of a technical object]. *Nauka i sovremennost* [Science and Modernity]. Vol. 27, pp. 169–173. (In Russ.).
6. Leliovskij, K. Ya. (2011) [The study of vibration characteristics of transmission units of automotive vehicles to improve their design]. *Vestnik NGIEI* [Proceedings of Volgograd State Technical University]. Vol. 1 (2), pp. 103–109. (In Russ.).
7. Fanzhao Kong, Wentao Huang, Yunchuan Jiang, Weijie Wang, and Xuezheng Zhao (2018) A Vibration Model of Ball Bearings with a Localized Defect Based on the Hertzian Contact Stress Distribution. *Shock and Vibration*. Vol. 2018. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/5424875>.
8. Liu, Jing & Shao, Yimin& Zhu, W.. (2015). A New Model for the Relationship Between Vibration Characteristics Caused by the Time-Varying Contact Stiffness of a Deep Groove Ball Bearing and Defect Sizes. *Journal of Tribology*. 137(3):031101. Available at: DOI: 10.1115/1.4029461.
9. Mishra, Chintamani&Samantaray, Arun&Chakraborty, Goutam. (2017). Ball bearing defect models: A study of simulated and experimental fault signatures. *Journal of Sound and Vibration*. 400. 86–112. Available at: DOI: 10.1016/j.jsv.2017.04.010.
10. Piltan, Farzin& Kim, Jongmyon. (2019). Nonlinear Extended-state ARX-Laguerre PI Observer Fault Diagnosis of Bearings. *Applied Sciences*. 9. 888. Available at: DOI:10.3390/app9050888.



11. Piltan, Farzin & Kim, Jongmyon. (2018). Bearing Fault Diagnosis by a Robust Higher-Order Super-Twisting Sliding Mode Observer. *Sensors*. 18. 1–22. Available at: DOI:10.3390/s18041128.
12. KeFeng, KeSheng Wang, Mian Zhang, Qing Ni and Ming J Zuo (2017) A diagnostic signal selection scheme for planetary gearbox vibration monitoring under non-stationary operational conditions. *Measurement Science and Technology*. 28 (3). Available at: doi:10.1088/1361-6501/aa543e.
13. Yi-Fan Li, MingJianZuo, KeFeng and Yue-Jian Chen (2017) Detection of Bearing Faults Using a Novel Adaptive Morphological Update Lifting Wavelet. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. [Post-print] 30 (6), pp. 1305–1313. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10033-017-0186-1#citeas>.
14. Yongbo Li, Yu Wei, KeFeng, Xianzhi Wang and Zhenbao Liu (2019) A fault diagnosis method for planetary gearboxes under non-stationary working conditions using improved Vold-Kalman filter and multi-scale sample entropy. *Journal of Sound and Vibration*. 439. Available at: doi.org/10.1016/j.jsv.2018.09.054.
15. Mian Zhang, KeSheng Wang, Dongdong Wei and Ming J. Zuo (2018) Amplitudes of characteristic frequencies for fault diagnosis of planetary gearbox. *Journal of Sound and Vibration*. 432. Available at: doi.org/10.1016/j.jsv.2018.06.011.
16. Khadem, S.E. and Rezaee, M. (2003) Development of vibration signature analysis using multiwavelet systems. *JSV*. 261 (4). Available at: doi:10.1016/S0022-460X(02)00992-6.
17. Widrow, B. and Stearns, S.D., (1985) *Adaptive Signal Processing*. USA: Prentice Hall.
18. McDonald, G. and Zhao, Q. (2011) Model-based adaptive frequency estimator for gear crack fault detection. Proceedings of the American Control Conference. 792–797. 10.1109/ACC.2011.5991553.
19. Chaturvedi, G.K., Thomas, D.W. (1981) Adaptive noise cancelling and condition monitoring. *Journal of Sound and Vibration*. 76(3), pp. 391–405.
20. Ifeachor, I. C. and Jervis, B. W. (1994) *Digital signal processing. A practical approach*. USA: Addison-Wesley.
21. Penkov, E., Kalimullin, R. (2019) [Theoretical approach of informativity assessment test parameter of car transmission]. *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. [Intelligence. Innovations. Investments]. Available at: doi:10.25198/2077-7175-2019-4-121.

#### Информация об авторах:

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

e-mail: [pea-li@mail.ru](mailto:pea-li@mail.ru)

**Руслан Флюрович Калимуллин**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильного транспорта, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

**ORCID ID:** 0000-0003-4016-2381, **Researcher ID:** E-9031-2015, **Scopus Author ID:** 6602711766

e-mail: [rkalimullin@mail.ru](mailto:rkalimullin@mail.ru)

**Владимир Арсентьевич Сологуб**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

e-mail: [v\\_arsentich@mail.ru](mailto:v_arsentich@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 13.11.2019; принята в печать 22.01.2020.

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](mailto:pea-li@mail.ru)

**Ruslan Flyurovich Kalimullin**, doctor of Technical Sciences, associate professor, professor of the department of automobile transport, Orenburg State University, Orenburg, Russia

**ORCID ID:** 0000-0003-4016-2381, **Researcher ID:** E-9031-2015, **Scopus Author ID:** 6602711766

e-mail: [rkalimullin@mail.ru](mailto:rkalimullin@mail.ru)

**Vladimir Arsentievich Sologub**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of the department of automobile transport, Orenburg State University, Orenburg, Russia

e-mail: [v\\_arsentich@mail.ru](mailto:v_arsentich@mail.ru)

The paper was submitted: 13.11.2019.

Accepted for publication: 22.01.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.