

УДК: 001.5
OECD: 01.03.AA

Мониторинг технического состояния транспортных средств по акустическим сигналам

Богданова А.М.¹, Горелик С.Л.²

¹ Аспирант кафедры «Экология и производственная безопасность», ассистент кафедры «Информационные системы и программная инженерия», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт Петербург, РФ

² Д.т.н, профессор факультета Инфокоммуникационных Технологий, СПб НИУ ИТМО «Санкт Петербургский Национальный Исследовательский Университет Информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Рассматривается методология комплексного мониторинга транспортных средств по акустическим сигналам, формируемым в процессе эксплуатации. Показано, что решение, основанное на оценке динамики энтропии объекта сложной системы может быть эффективным для диагностики состояния составных компонентов транспортных средств любого типа (двигателя, ходовой части, кондиционера и др.). Оптимальный набор параметров для мониторинга формируется на основе сигналов, получаемых с помощью акустических и/или вибрационных датчиков, установленных в транспортном средстве. В результате обработки данных мониторинга прогнозируются и выявляются критические изменения в состоянии транспортного средства, требующие принятия управленческих решений о возможности дальнейшей эксплуатации или ремонта. Разработанная методология позволяет прогнозировать состояние системы на основе онлайн сигналов, преобразуемых в управленческие решения для разных горизонтов и уровней управления [4].

Ключевые слова: мониторинг, акустические сигналы, феноменологическая модель, энтропия, интегральный параметр, прогнозирование.

Monitoring the signal of the technical condition of vehicles by acoustic signals

Bogdanova A.M.¹, Gorelik S.L.²

¹ *Postgraduate student of the department of Ecology and Industrial safety, assistant of the department of Information Systems and Software Engineering, Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov St.Petersburg, Russia*

² *DSc, professor of the Faculty of Infocommunication Technologies, Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russia*

Abstract

The methodology of complex monitoring of vehicles based on acoustic signals generated during operation is considered. The effective solution is based on an estimation of information entropy dynamic of an object and may be used for diagnosing the state of the constituent components of vehicles of any type (engine, chassis, air conditioner, etc.). The optimal set of parameters for monitoring is formed on the basis of signals received using acoustic and / or vibration sensors installed in the vehicle. As a result of processing monitoring data, critical changes in the condition of the vehicle are predicted and identified, requiring management decisions

on the possibility of further operation or repair. The developed methodology makes it possible to predict the condition of the system based on online signals that are converted into management decisions for different horizons and levels of management.

Keywords: monitoring, acoustic signals, phenomenological model, entropy, integral parameter, forecasting.

Введение

Повышение эффективности и безопасности перевозки пассажиров и грузов в значительной степени связано с необходимостью оперативного контроля технического состояния транспортных средств. Указанный контроль обычно осуществляется встроенной системой датчиков, обеспечивающих регулярное измерение технических характеристик отдельных узлов транспортного средства, сигналы с которых, поступающие через CAN-шину автомобиля преобразуются в показатели, выводимые на панель управления водителя и/или в автоматизированную аналитическую систему для формирования управленческого решения.

Сбор и обработка данных обо всех параметрах транспортного средства является очень сложной и дорогой процедурой. Однако, отказаться от нее невозможно, в силу необходимости получения актуальных и достоверных данных для оптимизации управления и обеспечения безопасности. Таким образом, необходимо искать способы и пути сокращения числа контролируемых параметров, создавать алгоритмы, позволяющие прогнозировать наличие нежелательных процессов в контролируемой системе, выработать рекомендации для более детального анализа отдельных систем (или групп систем) контролируемых объектов [1-4].

Сокращение числа контролируемых параметров может быть обеспечено путем формирования интегральных функций, которые зависят от основных технических параметров транспортного средства и измерение которых в процессе эксплуатации, не требует, значительных ресурсов. Тем самым, достигается возможность применить достаточно хорошо известные методы и алгоритмы на практике, без значительных затрат на предварительную разработку сложных математических моделей и создать удобную для реализации универсальную методологию мониторинга транспортного средства на основе акустических сигналов, генерируемых транспортным средством в процессе эксплуатации [4]. Следует отметить, что такое решение является аналогом диагностики, которую осуществляет опытный водитель и этот факт может использоваться для обучения системы распознавания на основе нейросетевых методов анализа. В результате, можно не только оценивать текущее состояние транспортного средства, но и прогнозировать возможные проблемы, вносить оперативные изменения в процесс управления.

Энтропийный подход к мониторингу, который использован в настоящей работе, основан на математических алгоритмах, вытекающих из теории информационного взаимодействия объектов [4-7]. Для его реализации создается информационная модель автомобиля, основанная на зависимости акустических сигналов [8-9], поступающих от транспортного средства, от текущего состояния двигателя, ходовой части, других компонентов автомобиля. В модели учитываются также параметры состояния внешней среды (погодных условий, дорожного покрытия).

1. Мониторинг динамики энтропии

Для сложных технических систем, таких как транспортное средство, энтропия является характеристикой динамической устойчивости - ключевого свойства системы, с точки зрения обеспечения стабильности и безопасности работы транспортного средства [4]. Поэтому, в нашей работе для контроля выбрана интегральная функция в виде информационной энтропии системы, производная которой непрерывно оценивается в процессе и мониторинга. Эта оценка основана на анализе изменения спектра акустических сигналов, поступающих от нескольких акустических (от 100 до 20 кГц) и вибрационных (от 0 до 100 Гц) датчиков с определенной пространственной диаграммой чувствительности к принимаемому сигналу. В настоящей работе используются несколько микрофонов с узкой приемной диаграммой, ориентированные на переднюю и заднюю части автомобиля, а также, вибрационные датчики, аналогичные используемым в мобильных смартфонах.

В качестве интегральной функции выбрана производная от энтропии по времени, которая указывает на повышение или снижение энтропии по сравнению с оценкой на предыдущем шаге мониторинга, что и реализуется в разработанной в настоящей работе методологии. Повышение энтропии является критерием ухудшения состояния объекта мониторинга (выхода из равновесного состояния). Если это повышение продолжается на протяжении нескольких циклов мониторинга (то есть, меры для снижения энтропии и возврата в равновесное состояние оператором транспортного средства не реализуются или недостаточны), то это позволяет сделать прогноз о том, что объект вышел из состояния равновесия и начал терять устойчивость. В этом случае формируется решение о необходимости реализации кризисных мер (комплексная диагностика транспортного средства на специальных стендах, приостановка эксплуатации и т.п.)

Количество базовых параметров, характеризующих состояние транспортного средства, очень велико. Критическое отклонение каждого из них в разной степени опасно для пользователя (разные коэффициенты влияния). Акустические сигналы, поступающие от двигателя, коробки передач, колесной системы и т.п. зависят от большинства базовых параметров. При примерно одинаковых внешних условиях эксплуатации изо дня в день, по определенным маршрутам и т.п. спектральные характеристики акустических сигналов в вероятностном смысле повторяются (с учетом таких случайных факторов внешней среды, как температура, давление, влажность). Таким образом, можно сформулировать:

Утверждение 1. Спектральные характеристики акустических сигналов, генерируемых транспортным средством, являются функциями параметров состояния технических узлов и внешней среды (температура двигателя и внешней среды, обороты двигателя, скорость движения и т.п.).

Параметры состояния определяют неисправности (износ или другие дефекты, недостаточность смазки, низкое давление в колесах и т.п.). Прогноз параметров состояния на текущий период эксплуатации (чаще всего на сутки) важнейший способ предотвратить эксцесс в процессе работы. Поэтому сформулируем утверждение 2:

Утверждение 2. Изменение спектральных характеристик акустических сигналов транспортного средства выше среднестатистического уровня предыдущего периода мониторинга, означает наличие потенциальной угрозы возникновения эксцесса в процессе дальнейшей эксплуатации.

Другими словами, если внешние условия остаются стабильными или прогнозируемыми, то и вероятность возникновения эксцесса в процессе эксплуатации на время после очередного цикла мониторинга остается на уровне предыдущего цикла. Определение периода мониторинга осуществляется по специальной методике, которая основана на априорных знаниях о транспортном средстве и режиме его эксплуатации.

Интегральная функция, которая используется для оценки состояния двигателя, является зависимость частоты оборотов (оценивается по спектру акустического сигнала) от времени. Изменение временного отрезка от начала до достижения максимального значения частоты оборотов двигателя в момент запуска перед началом рабочего дня и наличие в спектре нестандартных (отличающихся от предыдущего цикла измерения и с учетом изменения окружающей температуры) шумов, дают возможность прогнозировать состояние двигателя. Например, качество масла, механические повреждения механических деталей и другие факторы приведут к отличию полученных в текущем цикле измерений от прогнозируемых по результатам предыдущего цикла, которые будут выявлены в результате обработки результатов методами робастной статистики. Путем выявления различий спектральных характеристик сигналов с левой и с правой стороны, передней и задней оси выявляется повреждение колес (давление, дефект шин) и дефектов ходовой части. По этим же данным выявляются опасные отклонения в траектории движения (съезд на обочину или пересечение разделительной полосы), нарушение крепления груза, изменение характера дорожного покрытия (важно для пилотных и, особенно беспилотных автомобилей для принятия оперативных корректировок). Физический смысл прогнозирования значения интегральной функции в очередном цикле измерения в том, что высокая точность предсказания означает, что используемая модель транспортного средства достаточно полна и достоверно отражает реальную ситуацию (другими словами сохраняется низкий уровень априорной неопределенности).

2. Информационная фенологическая модель

Информационная фенологическая модель транспортного средства предполагает разбиение множества параметров, характеризующих состояние системы, на относительно независимые группы (факторизация) [4]. При этом группы параметров характеризуют состояние отдельных узлов транспортного средства. Фенологический подход означает использование в качестве модели обобщенной характеристики, которая отражает зависимость выходных сигналов от входных с учетом внешних параметров. При этом, знание о технических параметрах отдельных элементов не имеет значения. Важно только то, что, в случае нарушения равновесия системы, энтропия повышается, и этот факт будет влиять на точность прогнозирования интегральной функции. Повышение энтропии означает увеличение априорной неопределенности и свидетельствует о выходе из равновесного состояния, что опасно и требует внешнего воздействия на систему, чтобы вернуть ее в равновесие (навести «порядок»). Интегральная функция в рассматриваемой задаче - это зависимость спектра сигналов со всех акустических и вибрационных датчиков сигнала от времени. Параметры этой функции, например, время, через которое достигается стабильная частота после запуска (для двигателя), разность положения спектральных максимумов между «право» и «лево-ориентированными» акустическими датчиками из-за повреждения одного из колес и т.п. Признак, по которому диагностируется возникшая проблема, погрешность линейного предсказания значения следующего отсчета от текущего. Если погрешность увеличивается во времени, то принимается решение о выходе из равновесного состояния и необходимости корректирующих воздействий. Причины выявляются на основании, созданной экспертами или накопленной в процессе эксплуатации, «базы знаний» (предварительное обучение или самообучение системы). Интервал между отсчетами выбирается в зависимости от технологического цикла (например, частоты оборотов двигателя или скорости движения). Чем выше частота (или скорость движения, определяющая спектр акустического сигнала от колес), тем меньше должен быть интервал, чтобы обеспечить достаточную

точность линейного прогноза. Если прогнозируемые значения оцениваемых параметров отличаются от измеренных настолько, что не могут быть объяснены наличием случайных погрешностей измерения, то необходимо произвести робастное оценивание изменений на основе короткой выборки из нескольких отсчетов, и принять решение о необходимости внешнего воздействия на систему для восстановления ее состояния. Для углубленного анализа причин отклонений и типа воздействия проводится анализ «базы знаний» и/или привлекается эксперт, чтобы провести обследование отдельных подсистем в соответствии со структурной моделью системы [4].

Оператор F , который описывает модель объекта исследования (транспортного средства) после корректирующих управляющих воздействий, вызванных обнаруженными отклонениями прогнозных значений от реально измеренных, будет соответственно изменен.

Таким образом, множество выходных сигналов $\{U\}$ описывается как:

$$\{U_{i,j}(t)\} = F(\{x_i(t)\}, \{y_j(t)\}), \quad (1)$$

где $\{x\}$ - предсказуемые (предопределенные) входные параметры системы или ее элемента, полученные от стандартных партнеров по информационному взаимодействию и являющиеся функциями времени;

$\{y\}$ - «случайные» входные параметры системы или ее элемента, обусловленные воздействием внешней среды и также являющиеся функциями времени.

Изменение выходных сигналов $\{\partial U\}$ определяется первой производной по времени от входных, т.е.:

$$U'_{ij}(t) = F(0) + \frac{\partial F}{\partial x_i} x'_i + \frac{\partial F}{\partial y_j} y'_j, \quad (2)$$

Скорость изменения выходных информационных потоков и сигналов $\{\partial^2 U\}$ определяется второй производной по времени от входных информационных потоков и сигналов, т.е.:

$$U''_{ij}(t) = F(0) + \frac{\partial F}{\partial x_i} x''_i + \frac{\partial F}{\partial y_j} y''_j, \quad (3)$$

При этом, время для формул (1), (2) и (3) изменяется дискретно и определяется интервалом мониторинга.

Формулы (1), (2) и (3) справедливы как для системы, так и для отдельных ее элементов (подсистем) [4].

Динамическая система, какой является транспортное средство, постоянно взаимодействует с внешней средой, что обуславливает постоянное изменение параметра $\{y\}$ и, соответственно, увеличивает энтропию системы, выводя ее из состояния динамического равновесия за счет повышения уровня априорной неопределенности. В случае, если система не успевает снизить уровень неопределенности в рамках одного цикла мониторинга, т.е. не успевает вернуться в состояние динамического равновесия с помощью внешних корректировок, возникает угроза потери устойчивости (экссесса) [4]. В этом случае необходимо остановить транспортное средство и выявить причину отклонений.

Когда значения входных сигналов не меняются случайным образом от одного отсчета до следующего на протяжении нескольких циклов мониторинга, это означает, что энтропия системы остается неизменной, то есть, транспортное средство в предсказуемом (стабильном состоянии) [4].

Полученные таким образом интегральные и частные параметры и входные информационные потоки, а также причинно-следственные связи между ними используются для оценки устойчивости системы, в соответствии с формулами (1), (2) и (3) [4].

Заключение

Методология мониторинга состояния транспортного средства на основе динамики информационной энтропии, вычисляемой по результатам периодического мониторинга акустических сигналов двигателя, коробки передач, ходовой части и т.п. позволяет на основании данных мониторинга принимать решения о потенциальных угрозах безопасности, формировать проекты управленческих решений для оперативного и долгосрочного принятия мер. Тем самым, обеспечивается новый уровень диагностики и повышается безопасность движения.

Список литературы

1. Epifantsev. V.N. Adapting active control system to changes of detected signals shapes / V.N.Epifantsev, V.A. Komarov // Dynamics of systems, mechanisms and machines, №7819002, 2016.
2. Тэттэр, В.Ю. Определение технического состояния агрегатов железнодорожной техники в условиях нестационарных режимов работы / А.Ю.Тэттэр, В.Ю. Тэттэр // Омский научный вестник, 2017. № 6 (156). – С. 132-136.
3. Костюков, В.Н. Формирование вектора диагностических признаков на основе характеристической функции виброакустического сигнала / В.Н. Костюков, А.П. Науменко, С.Н. Бойченко, И.С. Кудрявцева // Контроль. Диагностика. 2016. № 8. – С. 22-29.
4. Горелик С.Л., Марков Я.Г., Чернышкова М.А. Мониторинг сложных систем на основе феноменологической модели. //Современные наукоемкие технологии Часть 1, №2, 2016, стр. 13-18 – Режим доступа. – URL: http://top-technologies.ru/pdf/2016/2016_2_1.pdf (дата обращения 16.03.2021).
5. Коротаев С. М. Энтропия и информация – универсальные естественнонаучные понятия // Институт исследований природы времени. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: http://www.chronos.msu.ru/old/RREPORTS/korotaev_entropia/korotaev_entropia.htm (дата обращения 14.03.2021).
6. Горелик С.Л., Марков Я.Г. Метаязык для междисциплинарного научного общения/Современные проблемы науки и образования. – № 6 – Режим доступа. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11158> (дата обращения 14.03.2021).
7. Горелик С.Л., Хаксельберг Е.Л., Марков Я.Г., Лещинский В.В.. Мониторинг человеко-машинных систем на основе анализа динамики информационной энтропии. // Труды ТУСУРа, № 1 (39), 2017 г.
8. Gorelik, S.L., Zubairova, G.O., Leshchinsky, V.V., Savelyev, M.F., Sosunova, I.A., Stasenko, S.A. Fedchenkov, P.V., Chernyshkova, M.A. Automated assessment of indicators of the quality of services for the transportation of passengers and cargo//13th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. In 12 volumes –2016. Vol. 10. Power Electronics and Mechatronics. Control Systems and Automatic Devices. Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk. – P. 169–174.
9. Грудинин В.А. Алгоритмы обнаружения и диагностики неисправностей колес грузовых автомобилей //Известия Курского государственного технического университета 2010 – №4(33) – с. 53-58

References

1. Epifantsev B.N. Adapting active control system to changes of detected signals shapes / B.N.Epifantsev, V.A. Komarov // Dynamics of systems, mechanisms and machines, №7819002, 2016.
2. Tatter, V.Yu. Determination of the technical condition of railway equipment units in the conditions of non-stationary operating modes/A.Yu. Tetter, V.Yu. Tatter // Omsk Scientific Bulletin, 2017, № 6 (156). – pp. 132-136.
3. Kostyukov, V.N. Formation of the vector of diagnostic signs based on the characteristic function of the vibroacoustic signal/V.N. Kostyukov, A.P. Naumenko, S.N. Boychenko, I.S. Kudryavtseva // Control. Diagnostics. 2016. No. 8. – pp. 22-29.
4. Gorelik, S.L., Markov, Y.G., Chernishkova, M.A. Monitoring of complex systems based on phenomenological model.// Modern High Tehnologies 2 (1) – 2016, P. 13-18. – Available at – URL: http://top-technologies.ru/pdf/2016/2016_2_1.pdf (date of the application 16.03.2021).
5. Korotaev S.M. Entropy and information – universal natural science concepts // Institute for the Study of the Nature of Time. [Electronic resource] – Available at – URL: http://www.chronos.msu.ru/old/RREPORTS/korotaev_entropia/korotaev_entropia.htm (date of the application 14.03.2021).
6. Gorelik S.L., Markov Ya.G. Metalanguage for interdisciplinary scientific communication / Modern problems of science and education. – № 6 – Available at – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11158> (date of the application 14.03.2021).
7. Gorelik S.L., Khakselberg E.L., Markov, Y.G., Leshchinsky V.V. Monitoring of human-machine systems based on the analysis of the dynamics of information entropy.// Proceedings of TUSUR, № 1 (39), 2017.
8. Gorelik, S.L., Zubairova, G.O., Leshchinsky, V.V., Savelyev, M.F., Sosunova, I.A., Stasenko, S.A. Fedchenkov, P.V., Chernyshkova, M.A. Automated assessment of indicators of the quality of services for the transportation of passengers and cargo//13th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. In 12 volumes –2016. Vol. 10. Power Electronics and Mechatronics. Control Systems and Automatic Devices. Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk. – P. 169–174.
9. Grudin V. A. Algorithms for detecting and diagnosing truck wheel misalignments// Tidings of the Kursk State Technical University 2010-No. 4 (33) – pp. 53-58