УДК 656:13

© И. О. Черняев, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: chernyaev@rambler.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-1-178-187

© I. O. Chernyaev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: chernyaev@rambler.ru

СПОСОБ КОРРЕКТИРОВКИ ПЕРИОДИЧНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ УЧЕТА НАКОПЛЕННОГО НАГРУЗОЧНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

METHOD FOR ADJUSTING THE FREQUENCY OF VEHICLES' MAINTENANCE BASED ON ACCOUNTING FOR THE ACCUMULATED LOAD IMPACT

Рассмотрен один из способов индивидуальной корректировки периодичности технического обслуживания транспортных средств. Данный способ разработан для применения в так называемых адаптивных системах технического обслуживания, позволяющих принимать решение о выполнении технических воздействий индивидуально для каждого транспортного средства с учетом особенностей его эксплуатации, повышая тем самым эффективность мероприятий по обеспечению технической готовности. На основе анализа недостатков существующих аналогов предложен способ, ориентированный на непрерывный контроль параметров, характеризующих эксплуатацию транспортного средства. Способ основан на применении «энергетического критерия» и предусматривает оценку степени нагружения транспортного средства и накопленного нагрузочного воздействия. Для данных величин приведены расчетные формулы. Адекватность способа проиллюстрирована результатами экспериментальных проверок. Для практической реализации разработанного способа приведен алгоритм, позволяющий учитывать накопленное нагрузочное воздействие для корректировки периодичности технического обслуживания.

Ключевые слова: периодичность технического обслуживания, корректирование нормативов технической эксплуатации, мониторинг эксплуатации, адаптивные системы технического обслуживания.

The article considers one of the ways of individual adjusting the frequency of vehicles' maintenance. This method has been designed for use in so-called adaptive maintenance systems that allow making a decision about performing technical actions individually for each vehicle, taking into account the specifics of its operation, thereby increasing the effectiveness of measures to ensure technical readiness. Basing on the analysis of the shortcomings of existing analogues, the author proposes the method that focuses on continuous monitoring of parameters that characterize the operation of the vehicle. The method is based on the application of the «energy criterion» and provides for an assessment of the vehicle loading degree and the accumulated load impact. Calculation formulas are given for these values. The adequacy of the method is illustrated with the results of experimental tests. For the practical implementation of the developed method, an algorithm is given that allows taking into account the accumulated load impact to adjust the frequency of the vehicles' maintenance.

Keywords: vehicles' maintenance frequency, adjusting the vehicles' maintenance standards, operation monitoring, adaptive maintenance systems.

Современные тенденции в области обеспечения работоспособности транспортных средств предполагают разработку и внедрение так называемых адаптивных систем технического обслуживания и ремонта (ТО и Р), решение о выполнении технических воздействий в которых

принимается индивидуально для каждого транспортного средства с учетом анализа режимов его эксплуатации [1, 2].

В настоящее время данные системы пока не получили широкого распространения, хотя уже существуют зарубежные примеры и отече-

ственные разработки организации мониторинга свойств автомобильной техники в эксплуатации для управления ее надежностью [3].

Данное обстоятельство объясняется необходимостью организации непрерывного контроля параметров, характеризующих режимы эксплуатации, а также необходимостью разработки алгоритмов анализа непрерывно получаемых данных [4]. Если современный технический уровень транспортных средств и современные технологии передачи данных позволяют решать первую задачу достаточно эффективно [1], то разработка алгоритмов анализа данных может быть названа в качестве фактора, сдерживающего развитие адаптивных систем ТО и Р. Сложность разработки таких алгоритмов объясняется как сложностью обоснования перечня контролируемых параметров, который бы характеризовал непрерывное взаимодействие нескольких десятков тысяч деталей транспортного средства [5] между собой и с постоянно изменяющимися условиями внешней среды, так и сложностью формализации зависимостей между контролируемыми параметрами и параметрами системы ТО и Р.

В связи с этим актуальна разработка единого комплексного критерия, простого для непрерывного контроля и имеющего непосредственную связь с изменением технического состояния транспортного средства (ТС) и его компонентов.

В качестве такого критерия может быть предложен так называемый «энергетический критерий». При эксплуатации ТС степень нагруженности его компонентов определяется «энергией, прошедшей через агрегат, узел, систему». Нагруженность в данном контексте определяет совокупность статических и динамических нагрузок на АТС, его компоненты, узлы, пары трения и отдельные детали, что напрямую определяет интенсивность их изнашивания и, следовательно, наработку до регулировки или замены. Также большая нагруженность требует большей выработки энергии. Для двигателей внутреннего сгорания (и агрегатов трансмиссии) это означает большой расход и более интенсивное изменение свойств эксплуатационных материалов.

Возможность применения «энергетического критерия» (или связанных с ним расхода топлива или КПД) подтверждается существующими разработками, также учитывающими его оцен-

ки технического состояния или эффективности эксплуатации транспортных средств [6, 7]. Связь режимов нагружения ТС и отдельных его компонентов с изменением их технического состояния подтверждена многими исследованиями [5, 8, 9]. В частности, связь нагруженности и периодичности технического обслуживания ТС обоснована в работе Бердникова И. Е. [10]. Однако методика, предложенная в указанной работе, имеет ряд недостатков. Автор, ссылаясь на «невероятную сложность непрерывного контроля», разрабатывает ее на основании априорного ранжирования жесткости условий эксплуатации с учетом их конечного перечня и периодического отслеживания. Данное обстоятельство не позволяет реализовывать данную методику полностью с использованием непрерывного контроля. Также ее использование для АТС затруднено из-за ориентированности преимущественно на эксплуатацию спецтехники с учетом наработки не в километрах пробега, а в мото-часах.

Для устранения указанных недостатков в целях определения нагруженности предлагается использовать модели, учитывающие сопротивление движению АТС [11]. Так, энергия, получаемая от сгорания топлива, может быть оценена по формуле [12]

$$E_{\text{топл}} \propto m_{\text{топл}} q \eta, \quad (1)$$

где $m_{\text{топл}}$ — масса сгоревшего топлива, кг; q — теплотворная способность топлива, Дж·кг; η — коэффициент полезного действия двигателя.

Данная энергия преобразуется в работу, совершаемую при движении транспортного средства, которая может быть оценена как

$$A_{\text{движ}} \propto \bar{P}_{\text{сд}} \cdot S, \quad (2)$$

где $\bar{P}_{\text{сд}}$ — средняя сила сопротивления движению, Н; S — путь, пройденный АТС, км.

Среднюю силу сопротивления движению можно считать основной характеристикой нагруженности АТС и его компонентов. С учетом того, что $E_{\text{топл}} = A_{\text{движ}}$,

$$\bar{P}_{\text{сд}} = \frac{m_{\text{топл}} q \eta}{S} = \frac{m_{\text{топл}} q \eta}{\bar{v} t}, \quad (3)$$

где $\bar{v}$ — средняя скорость движения АТС; t — время движения АТС.

Так как частное $m_{\text{топл}} / t = Q$ — общепринятый параметр, оценивающий часовой расход топлива, а произведение $q \cdot \eta$ постоянное для конкретного ТС, формулу (3) можно записать в виде

$$\bar{P}_{\text{сд}} = 10^{-3} k \frac{\bar{Q}}{\bar{v}}, \quad (4)$$

где $\bar{v}$ — средняя скорость движения АТС, км/ч; $\bar{Q}$ — средний часовой расход топлива, л/ч; k — коэффициент топливно-энергетической характеристики двигателя, Дж/л.

Указанное название для коэффициента k предложено исходя из того, что он учитывает теплотворную способность используемого двигателем топлива и его КПД, представляя их произведение ($k = q \cdot \eta$).

Возвращаясь к энергетическому критерию, степень нагруженности ТС и его компонентов, через которые передается энергия сгораемого топлива, целесообразно оценивать с помощью работы, на которую указанная энергия расходуется. Это работа силы тяги равна работе силы сопротивления движению. Тогда степень нагруженности, рассматриваемая как работа силы сопротивления движению, равная энергии, полученной от двигателя и «прошедшей» через компоненты АТС, будет определяться по формуле

$$E_{\text{нагр}} = \bar{P}_{\text{сд}} S = 10^{-3} k S \frac{\bar{Q}}{\bar{v}}. \quad (5)$$

Хотя для вывода формулы (5) был рассмотрен пример двигателя внутреннего сгорания, использующего традиционное жидкое топливо, данная формула является универсальной для оценки накопленного нагрузочного воздействия и ее применение от типа используемого топлива (типа источника энергии) не зависит, что позволяет использовать ее и с учетом развития альтернативной энергетики [13, 14].

Так, для двигателей, работающих на газообразном топливе, средний часовой расход топлива будет иметь единицы изменения м³/ч, а коэффициент топливно-энергетической характеристики двигателя — Дж/м³. Для электродвигателей коэффициент k будет представлять собой только КПД, а величина $\bar{Q}$ — среднюю мощность электродвигателя в Вт. Помимо расчетных значений k , можно использовать экспериментально полученные значения k , например, на стендах с беговыми барабанами путем одновременной фиксации величины силы тяги, расхода топлива и скорости [15, 16].

Для обеспечения индивидуальной коррекции периодичности ТО необходим учет накопленного нагрузочного воздействия $E_{\text{нагр}}^{\text{накопл}}$, определя-

ющего суммарное количество энергии, «прошедшее» через компонент ТС за определенное время. Для этого может быть использована формула

$$E_{\text{нагр}}^{\text{накопл}} = 10^{-3} k S \sum_{i=1}^n \frac{\bar{Q}_i}{\bar{v}_i}, \quad (6)$$

где $E_{\text{нагр}}^{\text{накопл}}$ — накопленное нагрузочное воздействие, кДж; k — коэффициент топливно-энергетической характеристики двигателя (для двигателей внутреннего сгорания $k = q \eta$, Дж/л или Дж/м³; для электродвигателей $k = \eta$); S — пройденное ТС расстояние, км; i — интервал контроля параметров; $\bar{Q}_i$ — средний часовой расход топлива на i -м интервале контроля, л/ч или м³/ч (для электродвигателей — мощность, Вт); $\bar{v}_i$ — средняя скорость движения на i -м интервале контроля, км/ч.

С учетом малости интервалов контроля, принимая допущение о линейности изменения параметров в течение малых промежутков времени, для расчета средних значений можно использовать формулы $\bar{Q} = \frac{Q_{i+1} - Q_i}{2}$, $\bar{v} = \frac{v_{i+1} - v_i}{2}$.

Для иллюстрации на рис. 1 приведены результаты выполненной с использованием формул (4)–(6) обработки информации, полученной в процессе непрерывного контроля средней скорости движения АТС и среднего часового расхода топлива в ходе экспериментального заезда ТС категории М1 (с механической коробкой передач) с малой скоростью по дороге, один отрезок которой имел грунтовое покрытие, находящееся в удовлетворительном состоянии, другой — асфальтовое покрытие, находящееся в хорошем состоянии. Режим движения был выбран специально как позволяющий показать характерные участки маршрута, которые явно видны на графике рис. 1.

Как видно на рис. 1, движение по дороге с грунтовым покрытием сопровождается большей степенью нагруженности, что объясняется более высоким значением коэффициента сопротивления движению. Разгон с места и переключение передач сопровождаются кратковременными пиками на кривой степени нагруженности, что является следствием сопротивления разгону и наличием момента инерции вращающихся масс в трансмиссии.

Также характерно кратковременное увеличение нагруженности во время включения конди-

ционирования салона. Хотя напрямую это дополнительное оборудование не влияет на изменение технического состояния подвески и трансмиссии, но его работа приводит к увеличению нагрузки на двигатель, повышенному расходу топлива, моторного масла и пр., что приводит к увеличению интенсивности изменения технического состояния силовой установки и вызывает необходимость изменения периодичности ТО. Таким образом, предложенный способ позволяет косвенно учесть работу дополнительного оборудования, установленного на транспортном средстве и не имеющего автономных источников энергии.

Для иллюстрации адекватности оценки степени нагруженности ТС в процессе реальной эксплуатации был выполнен непрерывный контроль параметров в процессе движения указанного выше ТС по реальной дорожной сети, включающей движение в пригородной зоне, движение по автомагистрали (со значительными

перепадами высот в продольном профиле дороги) и движение в городском цикле.

Зависимости скорости движения ТС и часового расхода топлива двигателем от времени представлены на рис. 2. На нем видны характерные отрезки, соответствующие циклам движения.

В загородном цикле наблюдаются существенные простои в заторе перед закрытым железнодорожным переездом. Также следует отметить небольшой участок в конце цикла движения по автомагистрали, в течение которого расход топлива соответствует работе двигателя на минимальных оборотах холостого хода, но скорость движения составляет порядка 80 км/ч. Этот участок соответствует движению накатом. Некоторое количество таких участков также присутствует на представленном графике.

Городской цикл характеризуется характерными остановками перед светофорами и частыми разгонами и торможениями. При этом во время

Рис. 1. Иллюстрация результатов непрерывного определения степени нагруженности ТС и накопленного нагрузочного воздействия в процессе его движения

Рис. 2. Результаты непрерывного контроля скорости движения ТС и часового расхода топлива при движении ТС по дорожной сети

разгона величина расхода топлива имеет достаточно большое значение, что соответствует характеристике цикла как режима эксплуатации с повышенным расходом топлива и частыми динамическими нагрузками на трансмиссию.

По результатам анализа данных непрерывного контроля были рассчитаны значения степени нагруженности. Интерес представляет их визуализация в привязке к карте маршрута, с помощью которой можно проиллюстрировать соответствие значений нагруженности характерным условиям движения. Для этого, помимо непрерывного контроля скорости движения АТС и часового расхода топлива, осуществлялся контроль геопозиционирования АТС (географические координаты, полученные с помощью системы GPS). Результаты расчета значений нагруженности с привязкой к маршруту следования АТС представлены на рис. 3.

Значения степени нагруженности представлены в масштабе цветовой шкалы. Как видно из

комментариев, приведенных на рисунке, рассчитанные по результатам непрерывного контроля значения степени нагруженности адекватно иллюстрируют характер движения, подтверждая применимость разработанного метода на практике.

К его преимуществам можно отнести комплексный учет всех процессов при эксплуатации ТС и определяющих их нагруженность в целом, его отдельных компонентов и изменение их технического состояния. Так, учтенными оказываются следующие факторы:

- квалификация водителя и стиль вождения — частые разгоны и торможения, приводящие к динамическим нагрузкам в агрегатах трансмиссии (и вызывающие, например, повышенный износ тормозных механизмов), повлияют на средний расход топлива, а также на величины средних скоростей, динамические нагрузки в агрегатах трансмиссии;

Рис. 3. Результаты расчета значений нагруженности ТС в процессе движения с привязкой к маршруту движения

- дорожные условия — напрямую будут учтены через зависимость расхода топлива от коэффициента сопротивления движению;
- природно-климатические условия — также учитываются косвенно с учетом зависимости расхода топлива, например, от температуры воздуха;
- интенсивность эксплуатации — непосредственно учитывается через изменение интенсивности роста значения накопленного нагрузочного воздействия.

Предложенный способ позволяет учесть загрузку транспортного средства и сложные условия движения, связанные с преодолением частых подъемов, бездорожья и пр., — указанные факторы приводят к увеличению сопротивления движению и, как следствие, к увеличению расхода топлива. При реализации на практике частые вариации загрузки транспортного средства, в том числе даже в рамках одного маршрута, за счет непрерывного контроля могут быть учтены с частотой вплоть до режима реального времени.

Однако необходимо указать и на недостаток предложенной методики. Он заключается в сложности подготовительного этапа, в ходе которого необходимо установление взаимосвязи $E_{\text{нагр}}^{\text{накопл}}$ с периодичностью ТО. Для решения этой задачи в первом приближении можно либо использовать уже полученные результаты [7], показывающие линейную зависимость наработки до появления отказа от накопленного нагрузочного воздействия, либо путем опытной эксплуатации выполнить обоснование такого предельного значения накопленного нагрузочного воздействия $E_{\text{нагр}}^{\text{накопл предельн}}$, при котором выполнение ТО необходимо в ближайшее время.

Для информирования о необходимости скорейшего выполнения ТО можно использовать условие, записанное следующим образом:

$$E_{\text{нагр}}^{\text{накопл}} \geq E_{\text{нагр}}^{\text{накопл предельн}} - \Delta D \cdot E_{\text{нагр}}^{\text{накопл}} \quad (7)$$

В формуле (7) ΔD — период упреждения, выражаемый, например, в днях. Его величина зависит от особенностей организации выполнения ТО. $E_{\text{нагр}}^{\text{накопл}}$ подразумевает производную $E_{\text{нагр}}^{\text{накопл}}$ по времени, представляющую собой скорость (интенсивность) изменения накопленной величины нагруженности $E_{\text{нагр}}^{\text{накопл}}$, которую можно определить по имеющимся данным непрерыв-

ного контроля с помощью методов численного дифференцирования.

Алгоритм корректировки периодичности технического обслуживания транспортных средств на основе учета накопленного нагрузочного воздействия представлен на рис. 4. Его применение позволит принимать решение о выполнении технических воздействий, направленных на обеспечение работоспособности ТС индивидуально для каждого транспортного средства, что будет способствовать повышению эффективности функционирования системы ТО и Р.

Библиографический список

1. Viktor Dobromirov, Vitaliy Verhorubov, Igor Chernyaev. Systematizing the factors that determine ways of developing the vehicle maintenance system and providing vehicle safety. *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. Pp. 114–121.
2. Черняев И. О. О необходимости и механизме формирования систем технической эксплуатации автотранспортных средств на основе непрерывного контроля их технического состояния // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2019. № 4 (57). С. 167–172.
3. Комаров В. В. Управление рисками и надежностью автотранспортных систем на основе мониторинга свойств автомобильной техники в эксплуатации // *Известия МГТУ*. 2008. № 2. С. 42–49.
4. Черняев И. О., Евтюков С. А. Реализация непрерывного контроля условий эксплуатации транспортных средств для коррекции режимов их технического обслуживания // *Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики / Международная научно-практическая конференция. 23–24 апреля 2020 г. IPDME-2020*. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. С. 818–824.
5. Техническая эксплуатация автомобилей. 4-е изд., перераб. и доп. / Е. С. Кузнецов, А. П. Болдин, В. М. Власов и др. М.: Наука, 2004. Положение о ТО и Р.
6. Власенко В. В. Энергетический критерий оценки эффективности эксплуатации автотранспортного средства // *Мир транспорта и технологических машин*. 2014. № 2 (45). С. 49–54.
7. Горбик Ю. В. Оценка технического состояния по расходу топлива и КПД автомобиля ваз-21104 // *Вестник ХНАДУ*. 2015. № 70. С. 33–37.
8. Воробьев С. А. Методика оценки влияния условий эксплуатации на техническую готовность автотранспортных средств: дис. ... канд. техн. наук // СПб., 2013. 172 с.

Рис. 4. Алгоритм корректировки периодичности технического обслуживания транспортных средств на основе учета накопленного нагрузочного воздействия

9. Кустиков А. Д. Обоснование корректирования периодичности обслуживания коробок передач автобусов для условий дорог с переменным продольным профилем: дис. ... канд. техн. наук. Оренбург, 2015. 177 с.

10. Бердников И. Е. Разработка диагностико-информационной подсистемы технического сервиса для обеспечения эксплуатационной надежности транспортно-технологических машин: дис. ... канд. техн. наук. Чита, 2017. 217 с.

11. Литвинов А. С., Фаробин Я. Е. Автомобиль: теория эксплуатационных свойств. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.

12. Шароглазов Б. А., Фарафонов М. Ф., Клементьев В. В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. 403 с.

13. Эдер Л. В., Немов В. Ю., Филимонова И. В. Перспективы энергопотребления на транспорте. Методические подходы и результаты прогнозирования // Мир экономики и управления. 2016. Т. 16, № 1. С. 25–38.

14. Paravantis J. A., Georgakellos D. A. Trends in energy consumption and carbon dioxide emissions of passenger cars and buses // Technological Forecasting and Social Change. 2007. Vol. 74. Issue 5. Pp. 682–707.

15. Савенков Н. В., Понякин В. В., Чекулаев С. А., Бутенко В. В. Анализ характеристик современного оборудования для определения тягово-скоростных свойств автомобилей в лабораторных условиях // Вестник СибАДИ. 2019. № 3 (67). С. 276–289.

16. Динамометрический инерционно-нагрузочный стенд DYNAMAX 4000 AWD BR. URL: <https://centr-to.ru/good-4887-dinamometricheskiy-inercionnonagruzochnyy-stend-dynamax-4000-awd-br#> (дата обращения: 31.01.2021).

References

1. Viktor Dobromirov, Vitaliy Verhorubov, Igor Chernyaev. Systematizing the factors that determine ways of developing the vehicle maintenance system and providing vehicle safety. *Transportation Research Procedia*, 2018, vol. 36, pp. 114–121.

2. Chernyaev I. O. О необходимости и механизме формирования систем технического обслуживания автотранспортных средств на основе непрерывного контроля их технического состояния [On the necessity and mechanism of forming systems of technical operation of motor vehicles on the basis of continuous monitoring of their technical condition]. *Izvestiya Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – Bulletin of the Saint-Petersburg State University*, 2019, no. 4 (57), pp. 167–172.

3. Komarov V. V. Управление рисками и надежностью автотранспортных систем на основе мониторинга свойств

автомобильной техники в эксплуатации [Risk management and reliability of motor transport systems based on monitoring the properties of automotive equipment in operation]. *Izvestiya MGTU – Bulletin of MSTU*, 2008, no. 2, pp. 42–49.

4. Chernyaev I. O., Evtyukov S. A. Realizatsiya nepreryvnogo kontrolya usloviy ekspluatatsii transportnykh sredstv dlya korrektsii rezhimov ikh tekhnicheskogo obsluzhivaniya. *Innovatsii i perspektivy razvitiya gornogo mashinostroeniya i elektromekhaniki* [Implementation of continuous monitoring of the operating conditions of vehicles for the adjustment of their maintenance modes. Innovations and prospects for the development of mining engineering and electric engineering]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 23–24 aprelya 2020 g. «IPDME–2020»* [Proceedings of the International scientific and practical conference, April 23–24, 2020] “IPDME–2020”. St. Petersburg, St. Petersburg Mining University Publ., 2020. pp. 818–824.

5. Kuznetsov E. S., et al. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya avtomobiley* [Technical operation of cars]. 4-th. ed., revised. Moscow, Nauka Publ., 2004.

6. Vlasenko V. V. Energeticheskiy kriteriy otsenki effektivnosti ekspluatatsii avtotransportnogo sredstva [Energy criterion for evaluating the motor vehicle operation efficiency]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin – World of transport and technological machines*, 2014, no. 2 (45), pp. 49–54.

7. Gorbik Yu. V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya po raskhodu topliva i kpd avtomobilya vaz-21104 [Assessment of the technical condition of the fuel consumption and efficiency of the VAZ-21104 automobile]. *Vestnik KhNADU – Bulletin of KhNADU*, 2015, no. 70, pp. 33–37.

8. Vorobev S. A. Metodika otsenki vliyaniya usloviy ekspluatatsii na tekhnicheskuyu gotovnost' avtotransportnykh sredstv. *Diss. kand. tekhn. nauk* [Methodology for assessing the impact of operating conditions on the technical readiness of motor vehicles. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2013, 172 p.

9. Kustikov A. D. Obosnovanie korrektirovaniya periodichnosti obsluzhivaniya korobok peredach avtobusov dlya usloviy dorog s peremennym prodol'nym profilem. *Diss. kand. tekhn. nauk* [Substantiation for adjusting the maintenance frequency of bus transmissions in regard to the conditions of roads with variable longitudinal profile. PhD in Sci. Tech. diss.]. Orenburg, 2015, 177 p.

10. Berdnikov I. E. Razrabotka diagnostiko-informatsionnoy podsystemy tekhnicheskogo servisa dlya obespecheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti transportno-tekhnologicheskikh mashin. *Diss. kand. tekhn. nauk* [Development of diagnostic and information subsystem of technical service for ensuring operational reliability of transport and technological machines. PhD in Sci. Tech. diss.]. Chita, 2017, 217 p.

11. Litvinov A. S., Farobin Ya. E. *Avtomobil': teoriya ekspluatatsionnykh svoystv* [Automobile; the theory of operational properties]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 240 p.
12. Sharoglazov B. A., Farafontov M. F., Klement'ev V. V. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya, modelirovanie i raschet protsessov* [Internal combustion engines: theory, modeling and calculation of processes]. Chelyabinsk, YuUrGU Publ., 2005, 403 p.
13. Eder L. V., Nemov V. Yu., Filimonova I. V. *Perspektivy energopotrebleniya na transporte. Metodicheskie podkhody i rezul'taty prognozirovaniya* [Prospects of energy consumption in transport. Methodological approaches and forecasting results]. *Mir ekonomiki i upravleniya – World of economics and management*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 25–38.
14. Paravantis J. A., Georgakellos D. A. Trends in energy consumption and carbon dioxide emissions of passenger cars and buses. *Technological Forecasting and Social Change*, 2007, vol. 74, iss. 5, pp. 682–707.
15. Savenkov N. V., Ponyakin V. V., Chekulaev S. A., Butenko V. V. *Analiz kharakteristik sovremennogo oborudovaniya dlya opredeleniya tyagovo-skorostnykh svoystv avtomobiley v laboratornykh usloviyakh* [Analysis of the characteristics of modern equipment for determining the traction and speed properties of cars in laboratory conditions]. *Vestnik SibADI – Bulletin of SibADI*, 2019, no. 3 (67), pp. 276–289.
16. *Dinamometricheskii inertsionno-nagruzochniy stend DYNOMAX 4000 AWD BR* [Dynamometer inertia-loading DYNOMAX 4000 AWD BR stand]. Available at: <https://centr-to.ru/good-4887-dinamometricheskii-inercionnonagruzochnyy-stend-dynomax-4000-awd-br#> (accessed: 31.01.2021).