УДК 656.135

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-197-202

© К. К. Тайсаев, соискатель

© К. К. Taysaev, competitor

© А. В. Терентьев, д-р техн. наук, доцент

© A. V. Terent'ev, Dr. Sci. Tech., Associate Professor

(Санкт-Петербургский государственный

(Saint Petersburg State University

архитектурно-строительный университет,

of Architecture and Civil Engineering,

Санкт-Петербург, Россия)

St. Petersburg, Russia)

E-mail: tkk2019@mail.ru aleksej.terentev.67@bk.ru

E-mail: tkk2019@mail.ru aleksej.terentev.67@bk.ru

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СОХРАНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОБУСОВ

ANALYTICAL MODEL FOR ASSESSING THE BUS EFFICIENCY PRESERVATION FACTOR

При определении условий, в которых приходится принимать решения в системе технической эксплуатации автобусов, необходимо рассматривать неизвестные на момент проектирования конструкции автобуса факторы или неопределенные факторы внешней среды, возникающие при эксплуатации автобусов на различных этапах срока его службы. К ним относятся: ужесточение нормативных требований к комфортабельности, конструктивной и экологической безопасности. В настоящее время в результате активизации воздействия внешней социальной среды на оценку качества эксплуатации автобусов и необходимости своевременного внедрения достижений научно-технического процесса в обеспечение безопасности пассажирских перевозок значимость данных факторов существенно возрастает и проявляется в течение одного срока эксплуатации автобусов. Комплексным показателем, позволяющим оценивать степень влияния активности внешней среды на сроки эксплуатации автобусов, является коэффициент сохранения эффективности (КСЭ). Поэтому разработка методов и математических моделей, достоверно определяющих и прогнозирующих значение КСЭ автобусов для различных условий эксплуатации, — актуальная научно-техническая проблема, а ее решение востребовано практикой. Представляем модель определения КСЭ автобусов, позволяющую решать задачи по нескольким актуальным критериям эффективности: надежность, конструктивная и экологическая безопасность, затраты на эксплуатацию.

Ключевые слова: коэффициент сохранения эффективности, конструктивная безопасность, экологическая безопасность, техническое обслуживание и ремонт автобусов, многокритериальная задача, внешняя среда эксплуатации.

When evaluating the conditions under which decisions have to be made in the bus technical operation system, it is necessary to consider factors that were unknown at the time of the bus design preparation or uncertain factors of the external environment, which arise during operation of buses at different stages of its service life. These include the tightening of regulatory requirements for comfort, structure and environment safety. At present, as a result of the increased impact of the external social environment on the assessment of the bus operation quality and the need to implement the achievements of the scientific and technical process on timely basis in ensuring the passenger transport safety, the importance of these factors has significantly increased and is becoming apparent during one service life of buses. A comprehensive indicator for assessing the impact of environmental activity on the bus life is the efficiency preservation factor (EPF). Therefore, the development of methods and mathematical models that reliably determine and predict the value of the EPF of buses for different operating conditions is a pressing scientific and technical problem, and its solution is demanded by practice. The article presents a model for assessing the EPF of buses, which allows solving problems according to several relevant efficiency criteria, namely, reliability, structural and environmental safety, operating costs.

Keywords: efficiency preservation factor, structural safety, environment safety, bus maintenance and repair, multi-criterion task, external operating environment.

В многочисленных исследованиях, посвященных оценке качества пассажирских перевозок и эксплуатации автобусов в РФ, отмечается ряд следующих проблем [1–4]¹:

¹ Транспорт в России. 2018. Статистический сборник (официальное издание). М.: Росстат, 2018. 101 с.

- Большинство автобусов в настоящее время эксплуатируются дольше установленного ресурса или нормативного срока службы, при этом подавляющее количество автобусов не отвечают ни экологическим международным требованиям,

ни требованиям к техническому уровню обеспечения конструктивной безопасности при перевозке пассажиров, что приводит к значительному социально-экономическому ущербу. Поэтому проблема соответствия автобусов современным техническим, экологическим и требованиям безопасности носит уже не только организационно-технический, но и социально-экономический характер и относится к области обеспечения эффективности решений сложных социотехнических систем в РФ.

- Принципиальное замечание к существующим подходам в решении актуальных задач технической эксплуатации автобусов — определение экономических показателей как доминанты в оценке качества пассажирских перевозок. То есть, если речь идет об обеспечении необходимого уровня безопасности предоставляемых услуг, целеполагание в системе показателей технической эксплуатации пассажирского авто-транспортного предприятия (ПАТП) должно учитывать не только эффективность процессов технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) автобусов, но и соответствие технического состояния автобусов социальным потребностям общества [5].

Анализ современной структуры показателей технической эксплуатации автобусов (ТЭА) показывает, что она является достаточно сбалансированной и позволяет реагировать инженерно-техническим службам (ИТС) ПАТП на текущие изменения в возрастной структуре парка автобусов, например, на увеличение или уменьшение интенсивности транспортной работы. Но вместе с тем существующая структура показателей системно замкнута, так как в ней не используются показатели, позволяющие отражать постоянное изменение социотехнических требований внешней среды эксплуатации автобусов. Данное положение объясняется тем, что применяемые сегодня методики управления сроками эксплуатации автобусов и возрастной структурой парка подвижного состава в ПАТП разрабатывались в середине прошлого века и в своей основе базируются на устаревших нормативно-технических документах, поэтому они не могут в полной мере соответствовать как существующему разнообразию возможных форм организации процессов ТО и Р автобусов, так и увеличению интенсив-

ности влияния социотехнических факторов внешней среды к качеству эксплуатации автобусов. Техническое решение проблемы состоит в разработке моделей ТЭА, позволяющих оценивать не только параметры работоспособности автобусов, но и продолжительность жизненного цикла сохранения качества, обеспечивающего экологическую и конструктивную безопасность, комфортабельность и т. д. То есть необходима модель, учитывающая внешние возмущения, к которым можно отнести и возмущения, вызываемые изменением социотехнических требований к качеству эксплуатации автобусов.

Сложная система ТЭА требует обязательного выполнения определенного уровня эффективности в заданных условиях их эксплуатации. В настоящее время классификация условий, в которых реализуются решения в системе ТЭА, определяется тремя основными группами факторов:

- первая группа — транспортные, дорожные, природно-климатические;
- вторая группа — уровень механизации, квалификации персонала и т. д.;
- третья группа — неопределенные факторы внешней среды, возникающие в процессе эксплуатации автобуса во времени.

Активизация влияния внешней социальной среды в виде требований безопасности, экологичности, комфортабельности к конструкции автобуса существенно увеличивает значимость третьей группы факторов, которые могут проявляться в течение одного срока службы автобуса. Влияние этой группы может быть определено с помощью коэффициента сохранения эффективности (КСЭ). Формально КСЭ представлен в ГОСТ 27.002–2015 «Надежность в технике. Термины и определения», где КСЭ трактуется как отношение значения показателя эффективности использования изделия по назначению за время в течение определенного периода к номинальному значению этого показателя, который рассчитывается при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают. Данная трактовка КСЭ указывает на то, что вероятность работоспособного состояния объекта, безусловно, необходимое, но не достаточное условие обеспечения надежности исследуемого объекта. Приведем более широкое толкование КСЭ на предмет поиска атрибутов достаточности обе-

спечения надежности исследуемого объекта на основании ряда научных работ [6–8]:

- КСЭ является очень удобным комплексным показателем надежности для тех систем, у которых большее значение выбранной характеристики наилучшее.

- КСЭ характеризует степень влияния отказов в системе на эффективность ее применения по назначению. Из определения теории надежности следует, что КСЭ может служить интегральным критерием оптимизации надежности системы. Действительно, критерий оптимизации — это показатель, для которого указана желаемая его величина или желаемое направление его изменения. Направление изменения коэффициента сохранения правильно выбранного показателя эффективности определяет основные ориентиры в поиске свойств системы, которые обеспечивают ее оптимальную надежность.

- КСЭ характеризует степень влияния отказов элементов объекта на эффективность его применения по назначению, при этом под эффективностью применения понимают его свойство создавать некоторый полезный результат (выходной эффект) в течение периода эксплуатации в определенных условиях.

- Для оценки экологической эффективности производств принят КСЭ, характеризующий степень влияния вредных выбросов на эффективность применения данного способа производства. На каждом шаге процесса подсчитывается значение КСЭ и показателя затрат.

- Некоторые комплексные показатели надежности относятся к пограничной области, объединяющей факторы надежности, технологической и экономической эффективности, в том числе и КСЭ.

Таким образом, теоретическая значимость разработки модели КСЭ заключается в том, что искомая модель получения эффективных решений в системе ТЭА должна позволять вырабатывать оптимальные решения в условиях многокритериальности целеполагания, наличия факторов неопределенной природы и при ограничениях, определяемых динамическими изменениями социотехнической среды эксплуатации автобусов. КСЭ должен служить параметром, оптимизирующим взаимодействие системы ТЭА с системами более высокого уровня, которые определяют

ся совокупностью требований общества к обеспечению качества обслуживания транспортом общего пользования.

В современной практике проектирования систем ТЭА в ПАТП в лучшем случае определяют коэффициент технической готовности (КТГ) и коэффициент технического использования (КТИ), которые служат только для одной цели: определить, исправен автобус или нет, и способен он перевозить пассажиров или нет, но не дают ответа на вопрос, обеспечиваются ли актуальные требования качества перевозки. Учесть качество перевозки пассажиров с учетом актуальных требований среды эксплуатации можно, дополнив традиционный подход к системе ТЭА с помощью параметра эффективности (Θ), используя его для определения КСЭ. Тогда формула для определения КСЭ примет вид:

$$КСЭ = \frac{1}{\Theta_n} \sum_{i=1}^n \Theta_i P_i, \quad (1)$$

где Θ_i — эффективность системы в i -м работоспособном состоянии автобуса; P_i — вероятность пребывания автобуса в i -м работоспособном состоянии; Θ_n — номинальное значение показателя эффективности объекта, определенное при условии отсутствия отказов или при соответствии их количества требованиям нормативной документации; n — количество работоспособных состояний объекта.

Качественно и количественно параметр Θ_i определяется решением многокритериальной задачи, характеризуемой следующими понятиями: m — количество рассматриваемых процессов (техническое обслуживание, технический ремонт, транспортная работа автобуса, квалификация водителей и т. д.); n — количество актуальных критериев среды эксплуатации; Θ_{ij} — эффективность i -го автобуса по j -му критерию, $i = 1, m$, а $j = 1, n$.

Тогда эффективность автобуса в отдельный момент времени (дискретное состояние) эксплуатации определяется матрицей эффективностей:

$$\Theta_A = \begin{vmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} & \dots & \Theta_{1n} \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} & \dots & \Theta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Theta_{m1} & \Theta_{m2} & \dots & \Theta_{mn} \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Данная задача требует применения специализированных методов решения многокритериальных задач [9–12]. В качестве рассматриваемого дискретного состояния эксплуатации автобусов принимается интервал ТО. В ряде научных работ разработаны алгоритмы расчета показателей ТО и ТР автомобилей, позволяющие адаптировать существующие методики определения производственной программы ТЭА к условию, когда в качестве расчетного цикла принимается интервал ТО [13, 14]. Это дает возможность сформировать в модели определения КСЭ вектор-строку номинальных (планируемых) значений показателя эффективности автобуса $\bar{\Theta}_n$. Тогда КСЭ определяется по формуле

$$КСЭ = \frac{1}{\bar{\Theta}_n = [\bar{t}_{ТОиТ\ ij}, \bar{\kappa}_{ij}, \bar{\vartheta}_{ij}, \bar{s}_{ij}]} \sum_{j=1}^n \Theta_{ij} P_{ij}, \quad (3)$$

где Θ_i — эффективность системы в i -м работоспособном состоянии автобуса; P_i — вероятность пребывания автобуса в i -м работоспособном состоянии; $\bar{t}_{ТОиТ\ ij}$ — удельная трудоемкость ТО и ТР i -го автобуса по j -му критерию; $\bar{\kappa}_{ij}$ — показатель эффективности по критерию конструктивная безопасность i -го автобуса по j -му критерию; $\bar{\vartheta}_{ij}$ — показатель эффективности по критерию экологическая безопасность i -го автобуса по j -му критерию; $\bar{s}_{ij}$ — показатель эффективности по критерию затраты на эксплуатацию i -го автобуса по j -му критерию.

Для определения отклонений значений показателей ТЭА от номинальных по ряду критериев эффективности в отдельных дискретных состояниях (интервалах ТО) и выявления закономерностей, определяющих КСЭ, необходимо сформировать матрицу отклонений эффективности текущего состояния автобусов:

$$\sum_{i=1}^n \Theta_i P_i = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где a_{ij}^k — вероятность эффективного состояния i -го автобуса по j -му критерию на отдельном интервале ТО;

$$a_{ij}^k = \Theta_{ij} P_i, \quad (5)$$

где k — индекс отдельного дискретного состояния — интервала ТО.

Для количества критериев, установленных в (3), то есть для четырех критериев эффективности матрица отклонений эффективности текущего состояния автобусов примет вид:

$$\sum_{j=1}^4 \Theta_{ij} P_{ij} = \begin{bmatrix} t_{ТОиТ\ 11} & \kappa_{12} & \vartheta_{13} & s_{14} \\ t_{ТОиТ\ 21} & \kappa_{22} & \vartheta_{23} & s_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{ТОиТ\ m1} & \kappa_{m2} & \vartheta_{m3} & s_{m4} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Тогда формула для определения КСЭ отдельного автобуса для отдельного дискретного состояния ТО примет вид:

$$КСЭ_i = \frac{1}{\Theta_n = [t_{ТОиТ\ ij}, \bar{\kappa}_{ij}, \bar{\vartheta}_{ij}, \bar{s}_{ij}]} \times \begin{bmatrix} t_{ТОиТ\ 11} & \kappa_{12} & \vartheta_{13} & s_{14} \\ t_{ТОиТ\ 21} & \kappa_{22} & \vartheta_{23} & s_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{ТОиТ\ m1} & \kappa_{m2} & \vartheta_{m3} & s_{m4} \end{bmatrix}_{ij}, \quad (7)$$

а среднее значение КСЭ для отдельной возрастной группы автобусов будет определяться по формуле

$$\overline{КСЭ}^k = \sum_{i=1}^m КСЭ_i. \quad (8)$$

Вывод

Разработанная модель определения КСЭ позволяет решать задачи с достаточно большим количеством критериев эффективности. Важным отличием представленной модели определения КСЭ в системе ТЭА ПАТП является формирование одного иерархического уровня критериев качества — работоспособность автобуса, безопасность (экологическая и конструктивная) и затраты на эксплуатацию. В этом случае прогнозируемые сроки эксплуатации автобуса могут корректироваться с учетом изменения информационной составляющей внешней среды. Комплексным показателем, оценивающим степень влияния внешней среды на сроки службы автобусов, является КСЭ, а процедура исследования процесса изменения КСЭ представима в виде динамической системы с отдельными дискретными состояниями ТО. Таким образом, формируется динамическая система управления возрастной структурой парка ПАТП с дискретными состояниями, соответствующими определенным этапам (циклам) эксплуатации автобусов.

Библиографический список

1. Андреев К. П. и др. Экономическое обоснование эффективности и качества пассажирских перевозок автомобильным транспортом. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2019. 129 с.
2. Бышов Н. В. и др. Экономические основы функционирования предприятий автомобильного транспорта. Рязань: РГТУ, 2019. 326 с.
3. Аринин И. Н., Прохоров В. Н. Оптимизация срока службы городских автобусов мегаполиса // Машиностроение. 2007. № 4. С. 40–46.
4. Прохоров В. Н. Научные основы управления эффективностью эксплуатации городских автобусов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.10. Владимир, 2008. 40 с.
5. Иголкин А. Н. Определение ресурса городских автобусов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. Владимир: Изд-во ВГУ, 2010. 165 с.
6. Кузнецов Е. С. Управление техническими системами. М.: МАДИ, 2003. 247 с.
7. Мороз С. М. Методы обеспечения работоспособного технического состояния автотранспортных средств. М.: МАДИ, 2015. 204 с.
8. Мартынушкин А. Б. Методика расчета интегрального показателя качества обслуживания населения автомобильным пассажирским транспортом // сб. ст. XI Междунар. науч.-техн. конф. Курск, 2019. С. 199–203.
9. Саати Томас Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / пер. с англ.; науч. ред. А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 360 с.
10. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций. М.: ИД «Вильямс», 2005. 912 с.
11. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление : пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 798 с.
12. Прудовский Б. Д. Методы решения многокритериальных автотранспортных задач // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 2 (49). С. 154–159.
13. Evtukov S., Karelina M., Terentyev A. A method for multi-criteria evaluation of the complex safety characteristic of a road vehicle characteristic of a road vehicle. Transportation Research Procedia, 36, 2018, pp. 149–156. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.057>.
14. Терентьев А. В., Евтюков С. С., Карелина Е. А., Куракина Е. В. Комплексная модель эффективности эксплуатации транспортного средства. СПб.: Петрополис, 2019. 236 с.

References

1. Andreev K. P., et al. *Ekonomicheskoe obosnovanie effektivnosti i kachestva passazhirskikh perevozk avtomobil'nym transportom* [Economic substantiation of efficiency and quality of passenger transportation by road motor vehicles]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2019, 129 p.
2. Byshov N. V., et al. *Ekonomicheskaya effektivnost', otsenka kachestva i sovershenstvovanie upravleniya passazhirskimi perevozkami v regione* [Economic efficiency, quality assessment and improvement of passenger transport management in the region]. *Ekonomicheskie osnovy funktsionirovaniya predpriyatiy avtomobil'nogo transporta* [Economic bases of functioning of automobile transport enterprises]. Ryazan, RGATU Publ., 2019, 326 p.
3. Arinin I. N., Prokhorov V. N. *Optimizatsiya sroka sluzhby gorodskikh avtobusov megapolisa* [Optimization of the service life of megalopolis city buses]. *Mashinostroenie – Mechanic Engineering*, 2007, no. 4, pp. 40–46.
4. Prokhorov V. N. *Nauchnye osnovy upravleniya effektivnost'yu ekspluatatsii gorodskikh avtobusov*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific bases of efficiency management of city buses operation. Author's thesis Dr. Sci. Tech. diss.]. Vladimir, 2008, 40 p.
5. Igolokin A. N. *Opredelenie resursa gorodskikh avtobusov*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Assessing the resource of urban buses. Author's thesis PhD in Sci. Tech. diss.]. Vladimir, VGU Publ., 2010, 165 p.
6. Kuznetsov E. S. *Upravlenie tekhnicheskimi sistemami* [Management of technical systems]. Moscow, MADI Publ., 2003, 247 p.
7. Moroz S. M. *Metody obespecheniya rabotosposobnogo tekhnicheskogo sostoyaniya avtotransportnykh sredstv* [Methods of ensuring the operable technical condition of motor vehicles]. Moscow, MADI Publ., 2015, 204 p.
8. Martynushkin A. B. *Metodika rascheta integral'nogo pokazatelya kachestva obsluzhivaniya naseleniya avtomobil'nym passazhirskim transportom* [Method of calculating the integral indicator of the quality of public service by automobile passenger transport]. *Trudy XI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proc. of the XI International scientific and technical conference]. Kursk, 2019, pp. 199–203.
9. Saati Tomas L. *Prinyatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh: Analiticheskie seti* [Decision-making in dependencies and feedback: Analytical networks]. Transl. from English, ed. by Andreychikov A.V., Andreychikova O. N.. Moscow, LKI Publ., 2008, 360 p.
10. Takha, Khemdi A. *Vvedenie v issledovanie operatsiy* [Introduction to operation research]. Moscow, Vil'yams Publ., 2005, 912 p.

11. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* [Fuzzy modeling and control]. Transl. from English. Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy Publ., 2009, 798 p.
12. Prudovskiy B. D. *Metody resheniya mnogokriterial'nykh avtotransportnykh zadach* [Methods for solving multi-criteria motor transport tasks]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 2 (49), pp. 154–159.
13. Evtiukov S., Karelina M., Terentyev A. A method for multi-criteria evaluation of the complex safety characteristic of a road vehicle. *Transportation Research Procedia*, 36, 2018, pp. 149–156. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.057>
14. Terent'ev A. V., Evtiukov S. S., Karelina E. A., Kurakina E. V. *Kompleksnaya model' effektivnosti ekspluatatsii transportnogo sredstva* [Complex model of vehicle operation efficiency]. St. Petersburg, Petropolis Publ., 2019, 236 p.