

Динамическая модель управления техническим обслуживанием ведомственного парка спецавтомобилей

Е.Г. Царькова

Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний», НИЦ-1, Москва

Аннотация: В работе рассматривается модель управления техническим обслуживанием транспортного парка территориального органа уголовно-исполнительной системы Российской Федерации. С применением теории массового обслуживания выделены возможные состояния системы, построен граф состояний, приведена система дифференциальных уравнений, описывающих динамику рассматриваемого процесса с учетом применения схемы расстановки приоритетов при проведении работ по обслуживанию и ремонту транспортных средств. В целях уточнения модели для вычисления интенсивностей отказов и восстановления спецавтомобилей предложено применять нейросетевую модель (многослойный персептрон). Приведены расчетные формулы для реализации алгоритма обучения рассматриваемой искусственной нейронной сети методом обратного распространения ошибки. Предложенная в работе модель может быть использована для построения автоматизированных систем поддержки принятия решений в сфере эксплуатации и ремонтов, а также совершенствования материально-технического обеспечения учреждений и органов уголовно-исполнительной системы Российской Федерации.

Ключевые слова: техническое обслуживание, надёжность, система массового обслуживания, многослойный персептрон, метод обратного распространения ошибки, специальный транспорт уголовно-исполнительной системы.

Исправность специального транспорта, используемого в деятельности учреждений уголовно-исполнительной системы Российской Федерации (УИС) для конвоирования осужденных и лиц, содержащихся под стражей, в том числе, на большие расстояния, является важнейшим условием выполнения ведомством задач по обеспечению безопасности и правопорядка [1]. Качественная организация и управление эксплуатацией технических средств требует разработки математических моделей и методов и использования их при создании современных автоматизированных систем управления, предназначенных для выработки эффективных управленческих решений [2]. Для моделирования процесса эксплуатации парка спецтранспорта территориального органа УИС может быть применен аппарат теории массового обслуживания (ТМО) [3]. Использование ТМО

позволяет определять значения параметров надежности автопарка, необходимые для оценки эффективности его эксплуатации [4].

В предположении ограниченности количества ремонтных бригад вводится в рассмотрение процедура расстановки приоритетов очередности проведения работ по обслуживанию и ремонту спецтранспорта. Алгоритм расстановки приоритетов оказывает влияние на величину интенсивности потока восстановления каждого из рассматриваемых транспортных средств [5, 6]. Схема алгоритма приведена на рис. 1.

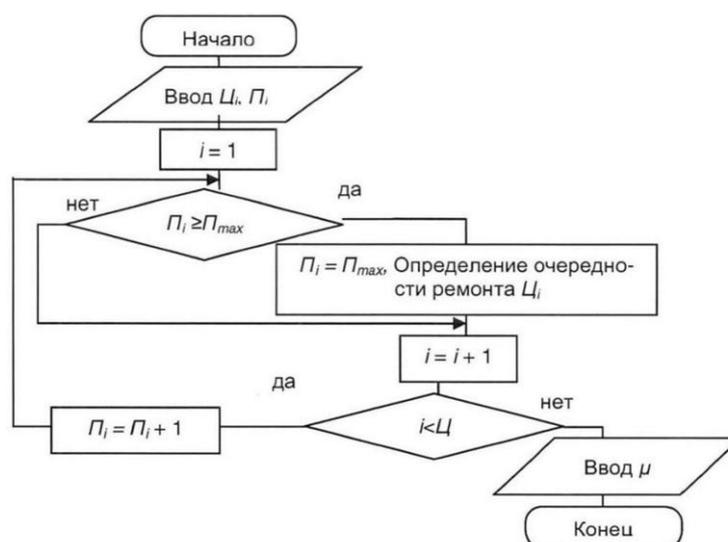


Рис. 1. – Схема алгоритма выбора приоритета при ремонте спецтранспорта

На рис. 2 приведен ориентированный граф текущего состояния парка специального транспорта территориального органа УИС, позволяющий описать динамику изменения состояния готовности моделируемой технической системы, состоящей из шести единиц специального транспорта. На приведенной схеме вершины графа соответствуют возможным дискретным состояниям отдельных автомобилей парка, а дуги – возможным переходам между данными состояниями [7].

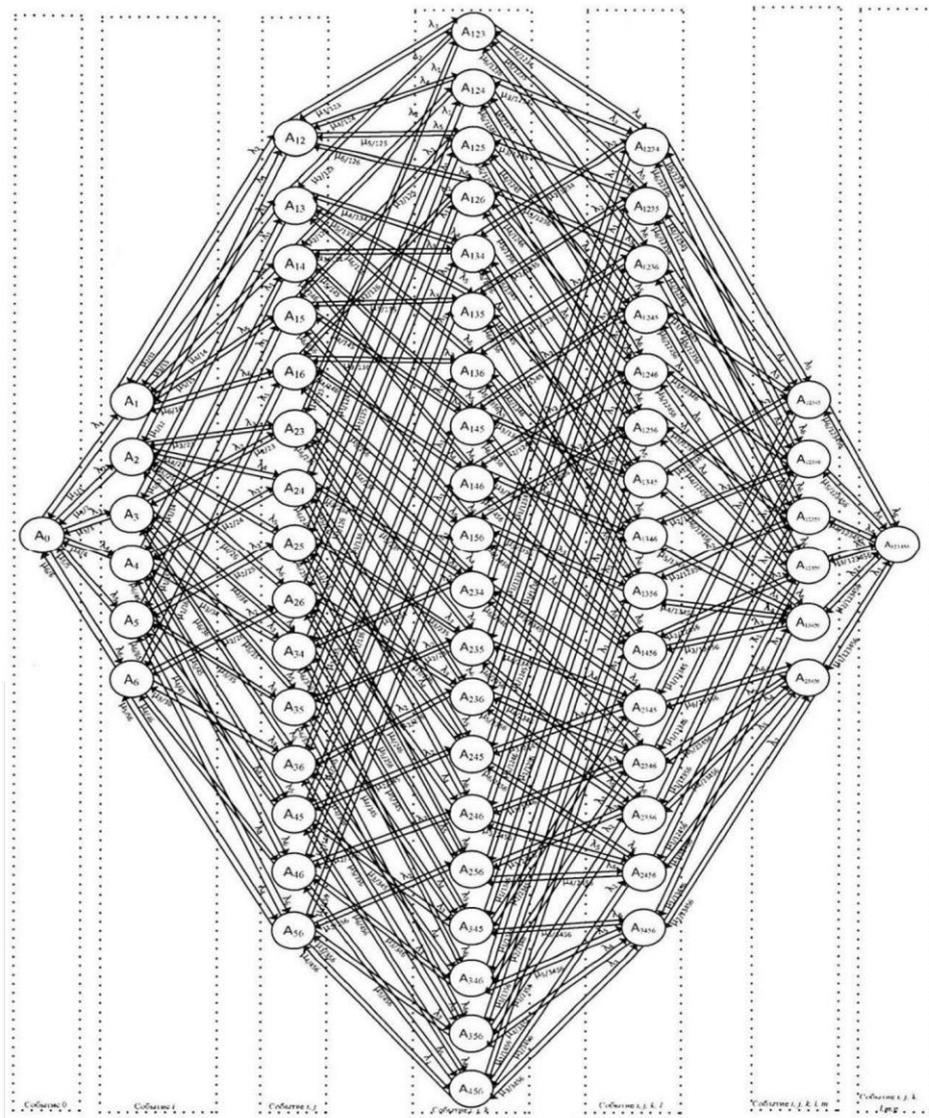


Рис. 2. – Граф состояний системы из шести специальных автомобилей

В приведенной схеме параметр $\lambda_i, i = \overline{1,6}$, определяет значение интенсивности потока отказов i -го транспортного средства. Величины $\mu_{i/j}, i = \overline{1,6}$, определяют значения интенсивностей потоков восстановления транспортного средства при условии, что из строя вышли специальные автомобили с номерами $\{j, \dots\}$.

Для определения интенсивности потока восстановления для каждого из рассматриваемых транспортных средств справедливы соотношения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{i/ij} = \mu_i \Pi_i^j, \\ \mu_{i/ijk} = \mu_i \Pi_i^{jk}, \\ \mu_{i/jkl} = \mu_i \Pi_i^{jkl}, \\ \mu_{i/jklm} = \mu_i \Pi_i^{jklm}, \\ \mu_{i/jklmg} = \mu_i \Pi_i^{jklmg}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где μ_i – показатель производительности ремонтной бригады, λ_i – интенсивность отказов транспортного средства, показатель Π_i^{jkl} характеризует приоритет ремонта i -го рассматриваемого специального транспортного средства перед j -м, k -м и l -м специальными автомобилями.

Для описания текущего состояния рассматриваемой системы в рассмотрение вводится вектор $P = (P_0, P_i, P_{ij}, P_{ijk}, P_{ijklm}, P_{ijklmg})$, компоненты которого соответствуют отказу одного автомобиля (i -го), двух автомобилей (i -го и j -го), трех (i, j, k), четырех (i, j, k, l), пяти (i, j, k, l, m) и шести автомобилей (i, j, k, l, m, g).

Динамика системы описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова для систем с дискретными состояниями и непрерывным временем следующего вида [8]:

$$\begin{aligned} \frac{dP_0}{dt} &= -P_0 \sum_{i=1}^6 \lambda_i + \sum_{i=1}^6 P_i \mu_i, \quad \frac{dP_i}{dt} = P_0 \lambda_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^6 P_{ij} \mu_{j/ij} - P_i \left(\mu_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^6 \lambda_j \right), \\ \frac{dP_{ij}}{dt} &= P_i \lambda_j + P_j \lambda_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \notin \{i, j\}}}^6 P_{ijk} \mu_{j/ijk} - P_{ij} \left(\mu_{i/ij} + \mu_{j/ij} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \notin \{i, j\}}}^6 \lambda_k \right), \\ \frac{dP_{ijk}}{dt} &= P_{ij} \lambda_k + P_{ik} \lambda_j + P_{jk} \lambda_i + \sum_{\substack{l=1 \\ l \notin \{i, j, k\}}}^6 P_{ijkl} \mu_{j/ijkl} - P_{ijk} \left(\mu_{i/ijk} + \mu_{j/ijk} + \mu_{k/ijk} + \sum_{\substack{l=1 \\ l \notin \{i, j, k\}}}^6 \lambda_l \right), \\ \frac{dP_{ijkl}}{dt} &= P_{ijk} \lambda_l + P_{ijl} \lambda_k + P_{jkl} \lambda_i + P_{ikj} \lambda_j + \sum_{\substack{l=1 \\ l \notin \{i, j, k, l\}}}^6 P_{ijklm} \mu_{m/ijklm} - \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 & -P_{ijkl} \left(\mu_{i/ijkl} + \mu_{j/ijkl} + \mu_{k/ijkl} + \mu_{l/ijkl} + \sum_{\substack{m=1 \\ m \notin \{i,j,k,l\}}}^6 \lambda_m \right), \\
 \frac{dP_{ijklm}}{dt} &= P_{jklm} \lambda_i + P_{iklm} \lambda_j + P_{ijlm} \lambda_k + P_{ijkm} \lambda_l + P_{ijkl} \lambda_m + P_{123456} \sum_{\substack{g=1 \\ g \notin \{i,j,k,l,m\}}}^6 \mu_{g/123456} - \\
 & -P_{ijklm} \left(\mu_{i/ijklm} + \mu_{j/ijklm} + \mu_{k/ijklm} + \mu_{l/ijklm} + \mu_{m/ijklm} + \sum_{\substack{g=1 \\ g \notin \{i,j,k,l\}}}^6 \lambda_g \right), \\
 \frac{dP_{123456}}{dt} &= P_{jklmg} \lambda_i + P_{iklmg} \lambda_j + P_{ijlmg} \lambda_k + P_{ijkmg} \lambda_l + P_{ijklm} \lambda_m + P_{ijklm} \lambda_g - P_{123456} \sum_{i=1}^6 \mu_{i/123456}, \\
 & P_0 + \sum_{i=1}^6 P_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^6 \sum_{j=1}^6 P_{ij} + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^6 \sum_{\substack{j=1 \\ k \neq \{i,j\}}}^6 \sum_{k=1}^6 P_{ijk} + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^6 \sum_{\substack{j=1 \\ k \neq \{i,j\}}}^6 \sum_{\substack{k=1 \\ l \notin \{i,j,k\}}}^6 \sum_{l=1}^6 P_{ijkl} + \\
 & + \sum_{i=1}^6 \sum_{\substack{j=1 \\ k \neq \{i,j\}}}^6 \sum_{\substack{k=1 \\ l \notin \{i,j,k\}}}^6 \sum_{l=1}^6 \sum_{\substack{m=1 \\ m \notin \{i,j,k,l\}}}^6 P_{ijklm} + P_{123456} = 1, \quad i, j, k, l, m, g = \overline{1,6}.
 \end{aligned}$$

В рассматриваемой модели отдельного внимания заслуживает определение точных значений интенсивностей отказов и восстановления транспортного средства, в общем случае, зависящих от значений величины пробега автомобиля (L), а также от возраста (T) транспортного средства. При построении модели эксплуатации спецтранспорта требуется знание точных значений интенсивностей потока отказов и восстановления специального служебного автомобиля. Теоретически, данные интенсивности могут быть получены с использованием анализа статистических данных об отказах и ремонтах для каждого специального автомобиля, но реализация такого трудоемкого подхода на практике видится затруднительным.

Современная теория надежности позволяет определять показатели эксплуатации технических систем в виде обобщенной наработки, характеризующей их степень износа. Значение обобщенной наработки транспортного средства тесно связано с его показателями пробега [9].

Обобщенная наработка транспортного средства может быть описана функционалом, зависящим от возраста транспортного средства (T), пробега (L), режима эксплуатации в заданных дорожных (W) и климатических (C) условиях, качества обслуживания (S) и хранения (R), следующего вида:

$$D = F(T, L, W, C, S, R). \quad (3)$$

Производительность ремонтной бригады, выполняющей работы по устранению неисправностей конкретного специального транспортного средства, во многом зависит от срока эксплуатации (T), а также величины пробега (L).

Для определения величины интенсивностей отказов и восстановления может быть применена искусственная нейронная сеть, обученная на наборе данных, где в качестве входных сигналов выступают значения L_i, T_i , а выходными сигналами являются величины λ, μ . В качестве нейросетевой модели предлагается использовать многослойный персептрон с одним скрытым слоем, обучаемый методом обратного распространения ошибки (ОРО) (рис. 3).

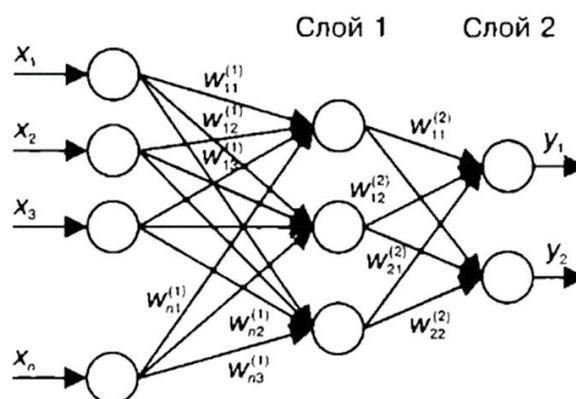


Рис. 3. – Многослойный персептрон

Рассмотрим схему обучения искусственной нейронной сети методом ОРО [10]. Пусть выход многослойного персептрона равен $d \in R^{M_k}$, где M_k –

количество нейронов выходного слоя, k – количество слоев сети. Тогда пара (y^0, d) , где $y^0 \in R^N$ – вход нейронной сети (N – количество нейронов входного слоя), является обучающей. Процесс обучения сводится к минимизации в пространстве весов целевой функции (функционала качества):

$$F = \|d - y\| \rightarrow \min, \text{ где } F = \sum_{i=0}^{M_k} \frac{1}{2} (d_i - y_i^{(k)})^2. \quad (4)$$

Для решения рассматриваемой оптимизационной задачи используется метод градиентного спуска с расчетными формулами для вычисления весов следующего вида:

$$w_{ij}^* = w_{ij} - \alpha \frac{\partial F}{\partial w_{ij}^{(p)}}, \quad (5)$$

где w_{ij}^* – значения весовых коэффициентов, полученные после одной итерации обучения, α – шаг градиентного спуска, характеризующий скорость сходимости алгоритма (коэффициент обучения).

Величина ошибки, распространяющейся на $(m-1)$ слой сети, вычисляется по формуле:

$$r_n^{(m)} = \sum_{i=0}^{M_{m+1}} r_i^{(m+1)} w_{in}^{(m+1)} f' \left(\sum_{j=0}^{M_{m-1}} w_{nj}^{(m)} y_j^{(m-1)} \right), \quad (6)$$

где $r_i^{(m+1)}$ – величина ошибки, пришедшей с $(m+1)$ -го слоя.

Для вычисления частной производной функционала качества по весам m -го слоя сети используем расчетные формулы следующего вида:

$$\frac{\partial F}{\partial w_{ij}^{(m)}} = r_i^{(m)} y_j^{(m-1)}. \quad (7)$$

В приведенных соотношениях $m = \overline{1, k-1}$ – номер слоя, $i = \overline{0, M_{m+1}}$, $j = \overline{0, M_{m-1}}$, $n = \overline{0, M_m}$ – счетчики итераций по соответствующим слоям нейронов. Полученные соотношения описывают процесс «распространения» ошибки от последнего слоя к первому.

Рассмотренная в работе модель эксплуатации системы парка специального транспорта территориального органа УИС, алгоритм расстановки приоритетов при проведении работ по обслуживанию и ремонту транспортных средств, а также схема обучения нейронной сети для получения значений интенсивностей отказов и восстановления могут быть применены для создания автоматизированных систем поддержки принятия решений, обеспечивающих возможность определения оптимального алгоритма очередности процессов обслуживания и ремонта, вычисления требуемого количества ремонтных бригад, а также выработки обоснованных предложений по комплектованию территориальных органов спецтранспортом и совершенствованию материально-технического обеспечения учреждений и органов УИС.

Литература

1. Бахтинова Ч.О., Чунаева М.Э. Автоматизация системы контроля качества при организации строительства особо опасных и технически сложных объектов в России // Инженерный вестник Дона, 2022, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7511.
2. Душкин А.В., Цветков В.В. Вопросы моделирования состояний инженерно-технических средств охраны и надзора // Вестник Воронежского института ФСИН России, 2014, №3, с. 28-31.
3. Сумин В.И., Чураков Д.Ю., Царькова Е.Г. Разработка моделей и алгоритмов информационных структур и процессов объектов особой важности // Промышленные АСУ и контроллеры, 2019, № 4. С. 30-39.
4. Каяшев А.И., Рахман П.А., Шарипов М.И. Анализ показателей надежности локальных компьютерных сетей // Вестник УГАТУ. 2013. №5, с. 140-149.

5. Омельченко В.В. Информационное обеспечение системы государственного управления национальными ресурсами: риск-ориентированный подход // Правовая информатика, 2019, № 1. С. 4-17.

6. Tsarkova E., Belyaev A., Lagutin Y., Matveev Y., Andreeva E. Technical Diagnostics of Equipment Using Data Mining Technologies // Safety in Aviation and Space Technologies: Select Proceedings of the 9th World Congress «Aviation in the XXI Century». Cham: Springer, 2022. Pp. 345-356.

URL: link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85057-9_30.

7. Игнатъева О.В. Архитектурные приемы при разработке программного обеспечения, зависящего от интерфейса пользователя // Инженерный вестник Дона, 2022, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7478.

8. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 55 с.

9. Dushkin A.V., Kasatkina T.I., Novoseltsev V.I., Ivanov S.V. An improved method for predicting the evolution of the characteristic parameters of an information system // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 973, No 1, 2018. P. 012031. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/973/1/012031/pdf.

10. Dubrovin A.S., Ogorodnikova O.V., Tsarkova E.G., Andreeva E.A., Kulikova T.N. Analysis and visualization in graph database management systems // Journal of Physics: Conference Series: Current Problems. Voronezh, V.1902, No 1, 2021. P. 012059. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1902/1/012059.

References

1. Bahtinova CH.O., CHunaeva M.E. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7511.



2. Dushkin A.V., Cvetkov V.V. Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii, 2014, №3, pp.28-31.
3. Sumin V.I., CHurakov D.YU., Car'kova E.G. Promyshlennye ASU i kontrollery, 2019, № 4. pp. 30-39.
4. Kayashev A. I., Rahman P. A., SHaripov M. I. Vestnik UGATU, 2013, №5, pp. 140-149.
5. Omel'chenko V.V. Pravovaya informatika, 2019, № 1. pp. 4-17.
URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_86_Akolzin.pdf_2394.pdf.
6. Tsarkova E., Belyaev A., Lagutin Y., Matveev Y., Andreeva E. Safety in Aviation and Space Technologies: Select Proceedings of the 9th World Congress «Aviation in the XXI Century». Cham: Springer, 2022. pp. 345-356.
URL: link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85057-9_30.
7. Ignat'eva O.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №2.URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7478.
8. Ventcel' E.S. Issledovanie operacij [Operations research]. M.: Sovetskoe radio, 1972. 55 p.
9. Dushkin A.V., Kasatkina T.I., Novoseltsev V.I., Ivanov S.V. Journal of Physics: Conference Series. 2018, P. 012031. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/973/1/012031/pdf.
10. Dubrovin A.S., Ogorodnikova O.V., Tsarkova E.G., Andreeva E.A., Kulikova T.N. Journal of Physics: Conference Series: Current Problems. Voronezh, V.1902, No 1, 2021. P. 012059. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1902/1/012059.