

**И. Ф. Воронина, канд. техн. наук, Ф. М. Судак, канд. техн. наук,
В. С. Перов, С. М. Шаповалов, И. А. Троицкий, Ф. В. Молозин**

**Автомобильно-дорожный институт
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка**

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКАЗА ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ НА АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В продолжение проведенных исследований по повышению эффективности использования автомобильного транспорта рассматривается возможность оптимизации количества заказываемых запасных частей с использованием теории управления, которая базируется на общих положениях и методах теории сложных систем.

***Ключевые слова:** автомобильный транспорт, оптимизация заказа, запасные части, функция риска*

Введение

На данном этапе развития экономики Донецкой Народной Республики автомобильный транспорт вынужден функционировать в условиях неопределенной экономической ситуации и риска, постоянно возрастающей стоимости запасных частей, а также отсутствия возможности своевременной их доставки.

Выходом из этой непростой ситуации станет совершенствование системы материально-технического снабжения [1, 2], которая оказывает существенное влияние на коэффициент технической готовности подвижного состава.

На складах автотранспортных предприятий Республики необходимо обеспечить соответствующее количество и номенклатуру запасных частей для узлов и агрегатов автомобилей. Поэтому, по мере развития экономики, возникает необходимость совершенствовать методологические основы прогнозирования потребности в запасных частях и оптимизации их заказа.

Математическая модель числа отказов, построенная по распределению Пуассона, была разработана в [3]. В качестве основного показателя прогнозирования расхода запасных частей с использованием данных об интенсивности замены деталей, эта модель позволит рассчитать потребность сменных деталей для автотранспортных предприятий (АТП) Донецкой Народной Республики.

Анализ публикаций

Разработкой методических принципов расхода запасных частей для предприятий автомобильного сервиса занимались следующие ученые: Я. М. Беркович, А. М. Шейнин, А. И. Иванов, В. А. Щетина, В. С. Лукинский [4], А. С. Гришин и др.

Указанные авторы в основном решали проблему обеспечения запасными частями автотранспортных предприятий в условиях детерминированного спроса, в то же время в их работах не нашли отражения вопросы формирования запаса на складах автотранспортных предприятий в условиях риска и неопределенности.

До сих пор нерешенной остается проблема оптимизации заказа запасных частей на АТП Донецкой Народной Республики.

Цель статьи

Повышение эффективности работы подвижного состава автомобильного транспорта на автотранспортных предприятиях Донецкой Народной Республики путем оптимизации количества заказываемых запасных частей.

Методика и результаты исследования

В процессе проведения дальнейших исследований по повышению эффективности использования автотранспортной техники целесообразно использовать теорию управления, которая, в свою очередь, базируется на общих положениях и методах теории сложных систем. Однако значительная часть теоретических положений теории управления имеет достаточно общий характер и может быть использована, после соответствующей переработки и дополнения, для анализа синтеза широкого класса сложных технических систем, используемых в транспортном процессе страны.

Осуществив прогнозирование потребности запасных частей [3], центральной задачей исследования следует в дальнейшем считать оптимизацию количества заказываемых запасных частей, так как от результатов ее решения зависит продолжительность простоев техники в период выполнения транспортных работ. Если определять потребность запасных частей для небольших предприятий по математическому ожиданию: $M_x = a_1 = \lambda L$ [3], то объем заказа некоторых деталей будет несколько меньшим, чем их фактическая потребность. Если же в качестве расчетного показателя использовать математическое ожидание, то заказ ряда позиций деталей будет значительно больше их фактической потребности. Оба варианта не являются оптимальными ни с позиций конкретных автотранспортных предприятий, ни с позиции настоящего развития экономики Донецкой Народной Республики. Наиболее экономичным решением данной задачи является определение потребности запасных частей для этих предприятий с учетом оптимизации объема заказа.

Задача определения оптимальных значений выходных характеристик системы эксплуатации является одной из основных в теории управления. Применительно к автомобильному транспорту следует найти такие значения выходных характеристик системы использования техники, при которых расходы на ее эксплуатацию будут минимальными. Согласно общим положениям теории управления [5, 6] исследования при изменяющихся характеристиках надежности используемой техники целесообразно проводить путем минимизации риска принятия неверного решения. Оптимальной считается такая величина искомого показателя, при которой функция риска минимальна.

Для упрощения последующих расчетов необходимо определить систему, которая включает в себя 100 автомобилей, после чего для такой системы рассчитать оптимальный заказ запасных частей на один год эксплуатации по критерию минимума риска.

Для проведения последующих расчетов необходимо обозначить:

C_1 – средняя стоимость планового заказа одной детали в момент q , включающая в себя затраты на доставку этой детали на склад;

C_2 – средняя стоимость хранения и технического обслуживания детали на складе в течение среднего времени ее нахождения на складе за период τ_q ;

$C_{1н}$ – средняя стоимость непланового заказа детали в интервале τ_q ;

$C_{1пр}$ – средняя стоимость нахождения машины в неработоспособном состоянии из-за несвоевременной доставки непланово заказанной детали в интервале τ_q .

Таким образом, средние затраты:

$$C_3 = C_{1н} + C_{1пр}. \quad (1)$$

Обозначим через X_q случайную величину числа деталей, которые будут необходимы в интервале эксплуатации τ_q , а через K_q – число деталей, которые заказаны и к началу интервала находятся на складе. Для рационального управления производственными запасами рассмотрим функцию потерь $C(V_q)$ как функцию случайного аргумента:

$$V_q = X_q + K_q. \quad (2)$$

С целью практической реализации рассмотрим функцию $C(V_1)$ для интервала эксплуатации $\tau(q=1\text{год})$. Случайная величина X_q принимает значения в пределах $(0, \infty)$, поэтому в соответствии с формулой (2) случайная величина V_q лежит на интервале $(-K_q, \infty)$.

Расходы на плановый заказ K_1 деталей составляют $(C_1 K_1)$, а затраты на их хранение и техническое обслуживание $(C_2 K_1)$ в течение срока τ_1 .

Увеличение потерь за счет непланового заказа каждой детали, дополнительно потребовавшейся сверх запаса K_1 , составляет $(C_3 V_1)$.

Таким образом, функция потерь равна:

$$C(V_1) = \begin{cases} K_1(C_1 + C_2), & (-K \leq V_1 \leq 0); \\ C_3 V_1, & (1 \leq V_1 \leq \infty). \end{cases} \quad (3)$$

Для того чтобы построить функцию риска, являющуюся математическим ожиданием функции потерь, необходимо знать распределение случайной величины V_1 или X_1 . В соответствии с ранее проведенными исследованиями [3] установлено, что на произвольном интервале времени поток отказов и замен деталей – пуассоновский с параметром a_1 , что является математическим ожиданием числа требующихся запасных частей на интервале τ_q (годовой пробег автомобиля).

С учетом формулы (3) математическое ожидание функции потерь, являющееся функцией риска, согласно теории управления можно представить выражением:

$$K_1(C_1 + C_2) \sum_{X=0}^{K_1} \frac{a_1^X}{X!} e^{-a_1} + C_3 \sum_{X=K_1+1}^{\infty} (X - K_1) \frac{a_1^X}{X!} e^{-a_1}. \quad (4)$$

Первый член этого выражения определяет математическое ожидание потерь при удовлетворении заявок со склада, на котором находится K_1 деталей, а второе – математическое ожидание затрат при неплановых заказах деталей сверх запаса K_1 .

Зависимость (4) преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{C}(K_1) &= K_1 \sum_{X=0}^{K_1} \frac{a_1^X}{X!} e^{-a_1} + \bar{C}_3 \sum_{X=K_1+1}^{\infty} (X - K_1) \frac{a_1^X}{X!} e^{-a_1} = \\ &= K_1 \sum_{x=0}^{K_1} \frac{a_1^X}{X!} e^{-a_1} + \bar{C}_3 \sum_{X=K_1+1}^{\infty} X \frac{a_1^X}{X!} e^{-a_1} - \bar{C}_3 K_1 \left(1 - \sum_{X=0}^{K_1} \frac{a_1^X}{X!} e^{-a_1} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\bar{C}_3 = \frac{C_3}{C_1 + C_2}$.

Согласно рекомендации [5], окончательное выражение целевой функции имеет вид:

$$\bar{C}(K_1) = K_1 (K + \bar{C}_3) \sum_{X=0}^{K_1} \frac{a_1^X}{X!} e^{-a_1} - \bar{C}_3 K_1 + \bar{C}_3 \sum_{X=K_1+1}^{\infty} \frac{a_1^X}{X!} e^{-a_1}. \quad (6)$$

Минимизируя функцию риска (6) с учетом a_1 , рассчитанного по результатам предыдущих исследований, можно найти оптимальную по критерию минимума риска величину K_1 .

Общее оптимальное число деталей, которое должно быть заказано для эксплуатации в

течение года для 100 автомобилей, каждый из которых содержит n таких деталей, составит:

$$W_{3q} = 100K_1n. \quad (7)$$

При многократном пополнении запасов в определенные моменты эксплуатации системы задано число «1» раз пополнения запасов. В этом случае выполняется условие:

$$\tau_3 = \sum_{q=1}^l \tau_q. \quad (8)$$

Для каждого интервала запас может быть найден решением уравнения (6) с учетом (7). Однако в этом случае после первого интервала τ_1 , на котором будет израсходовано какое-то количество деталей, новый заказ должен быть сделан с учетом остатка.

Расчет дополнительного заказа деталей для интервала τ_q после завершения τ_{q-1} интервала эксплуатации при остатке запасных деталей сводится к определению величины $100(K_q - \tau_q)$ заказа на 100 автомобилей для интервала τ_q при минимизации функции риска:

$$\begin{aligned} \bar{C}(K_q) = & K_q(1 + \bar{C}_{3q}) \sum_{X=0}^{K_q} \frac{a_q^X}{X!} e^{-a_q} - \bar{C}_{3q} K + \\ & + \bar{C}_{3q} K_q \sum_{X=K_q+1}^{\infty} X \frac{a_q^X}{X!} e^{-a_q} = \min. \end{aligned} \quad (9)$$

В качестве исходных данных должны быть заданы \bar{C}_{3q} и $a(t)$.

Но дискретная функция (9) позволяет только приблизительно оптимизировать решаемую задачу путем определения дискретного экстремума. Истинный экстремум находится в какой-то промежуточной точке интервала оптимизации (между двумя соседними дискретными значениями). Для его определения необходимо рассчитать на этом ограниченном интервале дискретно-непрерывную функцию и оптимизировать. Суть такой оптимизации заключается в следующем: по соседним критическим значениям дискретной функции необходимо определить интервал оптимизации, в котором находится истинный экстремум – оптимальное значение \hat{K}_1 . На основании теоремы Котельникова [7] отрезок прямой на этом ограниченном интервале необходимо заменить непрерывной функцией – многочленом, проходящим через точки дискретного интервала. Наиболее подходящей является квадратная функция общего вида:

$$y = Ax^2 + Bx + C. \quad (10)$$

График этой функции – парабола с осью симметрии, расположенной параллельно оси ординат. Коэффициенты A и C определяются по трем точкам. Две точки являются концами дискретного интервала оптимизации, а третью необходимо определить, исходя из точности вычисления ординат дискретной функции. Точность абсциссы и ординаты необходимо брать на один-два порядка выше, чем аналогичные дискретные показатели целевой функции риска. Если не придерживаться этого принципа, то может оказаться, что экстремум аппроксимирующей функции выйдет за пределы интервала оптимизации.

Также может оказаться, что экстремум лежит вблизи конца дискретного интервала оптимизации или в самом конце интервала. При этом нет гарантии, что экстремум принадлежит именно этому интервалу. В аналогичной ситуации поступают следующим образом. По трем точкам дискретной целевой функции строят параболу и исследуют ее классическим методом. Этим уточняется вопрос о принадлежности экстремума к соответствующему дис-

кретному интервалу и оценивается точность. Увеличив точность квантования, в соответствии с результатами уточнения находим истинный, а не дискретный экстремум.

Следовательно, для определения координат минимальной точки с точностью ΔK_1 будем полагать, что в интервале оптимизации имеет место непрерывная параболическая функция вида:

$$\bar{C}(K_1) = AK_1^2 + BK_1 + C. \quad (11)$$

Составив систему трех уравнений и решив ее, определим числовые значения коэффициентов A, B и C . Полученное для участка оптимизации уравнение параболы исследуем на экстремум:

$$\frac{d\bar{C}(K_1)}{dK_1} = 2A\hat{K}_1 + B = 0. \quad (12)$$

Из уравнения (12) находим истинное значение оптимального показателя:

$$\hat{K}_1 = -\frac{B}{2A}. \quad (13)$$

Таким образом, при математическом ожидании расхода соответствующей детали $a_1 = \lambda L_{200}$ получено оптимальное решение при \hat{K}_1 , так как в этом случае значение вычисляемой функции минимально. Оптимальный же годовой запас деталей на 100 автомобилей при этом определяется по формуле (7).

Анализ функции риска (9) свидетельствует о том, что эффективность использования подвижного состава автомобильного транспорта во многом зависит от совершенства его конструкции и качества ремонта, что характеризуется меньшим математическим ожиданием a_1 числа требующихся запасных частей на интервале τ_q .

Выводы

Предложенная методика даст возможность повысить эффективность работы подвижного состава автомобильного транспорта на АТП Донецкой Народной Республики посредством оптимизации заказа запасных частей, что, с одной стороны, позволит ликвидировать возникший дефицит запасных частей, а с другой стороны, удовлетворит потребителей транспортной продукции.

Список литературы

1. Судак, Ф. М. Усовершенствование методики расчета необходимого количества запасных частей на предприятиях автомобильного транспорта / Ф. М. Судак, И. Ф. Воронина, А. И. Заика // Вести Автомобильно-дорожного института = Bulletin of the Automobile and Highway Institute. – 2018. – № 3(26). – С. 44–48.
2. Оптимизация затрат на управление резервом запасных частей на автосервисных предприятиях / Ф. М. Судак, И. Ф. Воронина, А. В. Еремин, Г. В. Новиков // Вести Автомобильно-дорожного института = Bulletin of the Automobile and Highway Institute. – 2019. – № 2(29). – С. 35–41.
3. Прогнозирование потребности в запасных частях для автотранспортных предприятий / И. Ф. Воронина, Ф. М. Судак, В. В. Негурица, А. И. Веденичев // Вести Автомобильно-дорожного института = Bulletin of the Automobile and Highway Institute. – 2020. – № 3(34). – С. 33–37.
4. Лукинский, В. С. Прогнозирование надежности автомобилей / В. С. Лукинский, Е. И. Зайцев. – Ленинград : Политехника, 1991. – 224 с. – ISBN 5-7325-0021-9.
5. Воронина, И. Ф. Разработка системы мониторинга материально-технического обеспечения предприятий автосервиса / И. Ф. Воронина, Ф. М. Судак, А. В. Злей // Вести Автомобильно-дорожного института = Bulletin of the Automobile and Highway Institute. – 2018. – № 4(27). – С. 46–52.
6. Коваленко, И. Н. Расчет вероятностных характеристик систем / И. Н. Коваленко. – Киев : Техника, 1982. – 96 с.
7. Волков, Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов / Л. И. Волков. – Москва : Высшая школа, 1981. – 368 с.

И. Ф. Воронина, Ф. М. Судак, В. С. Перов, С. М. Шаповалов, И. А. Троицкий, Ф. В. Молозин
Автомобильно-дорожный институт
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка
Оптимизация заказа запасных частей на автотранспортных предприятиях

На данном этапе развития экономики Донецкой Народной Республики автомобильный транспорт вынужден функционировать в условиях неопределенной экономической ситуации и риска постоянно возрастающей стоимости запасных частей, а также отсутствия возможности своевременной их доставки.

Выходом из этой непростой ситуации станет совершенствование системы материально-технического снабжения, которая оказывает существенное влияние на коэффициент технической готовности подвижного состава.

Центральной задачей исследования следует считать оптимизацию количества заказываемых запасных частей, так как от результатов ее решения зависит продолжительность простоев техники в период выполнения транспортных работ.

Предложенная методика даст возможность повысить эффективность работы подвижного состава автомобильного транспорта на автотранспортных предприятиях Донецкой Народной Республики посредством оптимизации заказа запасных частей, что, с одной стороны, позволит ликвидировать возникший дефицит запасных частей, а с другой стороны, удовлетворит потребителей транспортной продукции.

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ, ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКАЗА, ЗАПАСНЫЕ ЧАСТИ, ФУНКЦИЯ РИСКА

I. F. Voronina, F. M. Sudak, V. S. Perov, S. M. Shapovalov, I. A. Troitskii, F. V. Molozin
Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka
Optimization of the Spare Parts Order at the Motor Transport Enterprises

At this stage of the economy development of the Donetsk People's Republic, the road transport is forced to function in the uncertain economic situation and in the context of the risk of constantly increasing cost of spare parts, as well as the lack of their timely delivery possibility.

The way out of this difficult situation will be to improve the material and technical supply system, which has a significant impact on the technical readiness of the rolling stock.

The central task of the study is to optimize the number of the ordered spare parts, since the results of its solution depend on the duration of the equipment downtime during the transport operations.

The proposed technique will make it possible to increase the rolling stock efficiency of the road transport at the motor transport enterprises of the Donetsk People's Republic by optimizing the order of spare parts, which, on the one hand, will eliminate the shortage of the spare parts, and on the other hand, will satisfy the consumers of the transport products.

AUTOMOBILE TRANSPORT, ORDER OPTIMIZATION, SPARE PARTS, RISK FUNCTION

Сведения об авторах:

И. Ф. Воронина

Телефон: +38 (071) 425-11-65

Эл. почта: voronina.adi@mail.ru

Ф. М. Судак

Телефон: +38 (06242) 2-40-40

Эл. почта: voronina.adi@mail.ru

Статья поступила 21.01.2021

© *И. Ф. Воронина, Ф. М. Судак, В. С. Перов, С. М. Шаповалов, И. А. Троицкий, Ф. В. Молозин, 2021*

Рецензент: С. В. Никульшин, канд. техн. наук, доц., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»