

УДК 004.9

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.28.1.013](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.28.1.013)

## Идентификация технической готовности транспортных и технологических машин крупного автотранспортного предприятия

Х.С. Салих<sup>1</sup>, С.Я. Егоров<sup>1</sup>, А.В. Затонский<sup>2</sup>, П.В. Плехов<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,  
Тамбов, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия

**Резюме:** Рассматривается крупное автотранспортное предприятие, машинный парк которого насчитывает сотни однотипных единиц транспортных и технологических машин осуществляющих обслуживание ряда пространственно удаленных друг от друга объектов (работа на карьерах, строительство, дорожные работы). Предложен подход к определению технической готовности подвижного состава крупного автотранспортного предприятия основанный на сборе и обработке статистической информации об отказах в работе транспортных средств и предложенной имитационной модели определения технической готовности автотранспорта. На основе статистического подхода разработан алгоритм идентификации технической готовности автотранспортных и технологических машин. Проведен численный эксперимент по определению вида аппроксимирующей функции для определения времени вывода автотранспорта в ремонт. В ходе имитационного моделирования по идентификации технической готовности автотранспортных и технологических машин получены данные, позволяющие обосновано определить время начала ремонта каждой из машин, что позволяет заранее начать подготовительные работы к ремонту, тем самым сократив время простоя машин в ремонте. В результате работы появляется возможность поддержки принятия управленческих решений по составлению и корректировке планов перевозок на удаленных строительных объектов, ведущей к повышению эффективности деятельности крупных автопредприятий.

**Ключевые слова:** статистика, ремонт, грузовой транспорт, имитационное моделирование, техническая готовность.

**Для цитирования:** Салих Х.С., Егоров С.Я., Затонский А.В., Плехов П.В. Идентификация технической готовности транспортных и технологических машин крупного автотранспортного предприятия. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(1). Доступно по: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/SalihSoavtors\\_1\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/SalihSoavtors_1_20_1.pdf) DOI:10.26102/2310-6018/2020.28.1.013

## Identification of technical readiness of transport and technological vehicles of a large transportation company

H.S. Salih<sup>1</sup>, S.Y. Egorov<sup>1</sup>, A.V. Zatonskiy<sup>2</sup>, P.V. Plekhov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tambov State Technical University, Tambov, Russia

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

**Abstract:** This paper focuses on a large transportation company with a fleet of hundreds of units of trucks and technological vehicles which service a number of distantly remote worksites (excavation works (quarries), construction, road works). The paper suggests an approach to determine the technical readiness of the large transportation company fleet, based on the collection and processing of statistical information about the vehicles' operational failures, and the proposed simulation model for determining

the technical readiness of the vehicles. An algorithm for identifying the technical readiness of auto transport and technological vehicles has been developed based on the statistical approach. A numerical experiment was carried out to determine the approximating function for determining the vehicles' repair time. During the simulation to identify the technical readiness of auto transport and technological vehicles, data was obtained that could reasonably determine the start time for the repair of each of the vehicles, which allows beginning preparatory work for repairs in advance, thereby reducing the downtime of vehicles during the repair. As a result, executive decision making becomes possible with regards to the preparation and adjustment of transport supply plans for the construction sites, leading to increased efficiency of the large transportation company.

**Keywords:** statistics, repair, freight transport, simulation, technical readiness.

**For citation:** Salih H.S., Egorov S.Y., Zatonskiy A.V., Plekhov P.V. Identification of technical readiness of transport and technological vehicles of a large transportation company. *Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(1). Available by: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/SalihSoavtors\\_1\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/SalihSoavtors_1_20_1.pdf) DOI:10.26102/2310-6018/2020.28.1.013 (In Russ.).

### Введение

Управление доходностью крупного автотранспортного предприятия (АТП), как и для большинства предприятий, производящих товары или оказывающих услуги, складывается из повышения доходности и снижения затрат. Применительно к автотранспортной организации затраты подразделяются на хорошо известные группы, приведенные в [1]. Оптимизация затрат не предполагает их максимальное уменьшение, так как затраты производятся для получения доходов в будущем. Поэтому в практике эконометрического моделирования транспортных предприятий эти доходы либо вносятся в состав целевой функции, либо включаются в ее ограничения [2].

Техническая готовность достаточной части автопарка является необходимым условием для своевременного выполнения заказов на перевозки и, следовательно, получения дохода. Ранее было показано [3], что техническая готовность одного конкретного транспортного средства (ТС) может быть выражена некоторым трендом (линейным, степенным, экспоненциальным и т.д.), определяемым регрессионными методами. На практике использование такого подхода затруднительно, так как исходной информацией для идентификации тренда является поломка ТС либо количественная диагностика, в результате которой в какой-то шкале становится известна именно готовность (надежность, гарантированная наработка на отказ). В числе прочих подходов, многие авторы указывают на высокую эффективность применения средств удаленной диагностики, непрерывно работающих на ТС [4, 5]. После нескольких поломок ТС, как минимум, подвергается агрегатному ремонту, то есть приобретает совершенно новые свойства, а результатом оперативной диагностики чаще является дискретное решение о необходимости ремонта или регулировок.

### Материалы и методы

Однако в условиях именно крупного АТП, располагающего большим парком автотранспортных и технологических машин, возможен статистический подход к идентификации готовности группы (класса) ТС. Пусть под коэффициентом готовности  $G_i$  подразумевается вероятность, что в случае назначения задания на перевозку, ТС его выполнит, и  $G_i(t) = \varphi_i(t), t > 0, 1 > G_i(t) \geq 0$ . Здесь  $i$  – номер группы ТС, для которой производится идентификация. Очевидно, что в составе группы должны быть схожие ТС близких годов выпуска, имеющие одинаковую или почти одинаковую ходовую часть. Вопросы надежности специальных средств, смонтированных на ходовую часть

(разрушения бортов, неисправность гидроцилиндра самосвала и т.п.) обычно не являются лимитирующими, так как легко обнаруживаются и устраняются.

Источниками информации для идентификации в данной задаче являются:

1. Сведения о состоявшейся поломке ТС, то есть  $t^* : G_i^*(t^*) = 0$ , здесь обозначение  $G^*$  принято для фактического события.
2. Сведения о результатах аппаратной технической диагностики в той части, когда немедленный ремонт не требуется, но прогнозируется:  $\Delta t : G_i^*(t + \Delta t) \rightarrow 0$ , где  $t$  – момент диагностики.
3. Сведения о результатах экспертной оценки состояния ТС (водителем, механиком автопарка и т.д.), по форме аналогичные предыдущим.

Очевидным начальным условием является  $G_i^*(t_0) = 1$ , где  $t_0$  - момент ввода ТС в эксплуатацию.

Следует учитывать, что сведения вида 1 (о поломке) совершенно достоверны, тогда как остальные сведения содержат неустранимую случайность. Современные средства оперативной диагностики ТС, как правило, сообщают о немедленной необходимости каких-либо действий. Решение о продолжении эксплуатации на какой-то период в этих случаях принимается человеком, и на его качестве сказывается человеческий фактор.

Сведения о периодических процедурах технического обслуживания (ТО) ТС, наподобие замены масла или воздушного фильтра, во внимание не принимаются, так как ТО это плановый процесс, совершенно просто учитываемый при планировании перевозок, в отличие от случайных поломок [6].

Расчет коэффициентов функции  $\varphi_i(t)$  и, при необходимости, идентификация ее вида может производиться немедленно после поступления информации любого вида (1, 2, 3 в вышеприведенном списке) или периодически по мере накопления наборов сведений. В любом случае будет решаться обычная задача регрессионного анализа

$$S = \sum_j (G_i^*(t_j - t_0) - \varphi_i(t_j - t_0))^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

Ее особенность в том, что для сведений 2 и 3 типа оценка времени, в которое коэффициент готовности снизится ниже приемлемого предела, содержит ошибку. В качестве исходных данных для (1) в этом случае будем иметь в момент времени  $t$  прогноз  $G_i^*(t + \Delta t \pm \delta t) = 0$ , где  $\delta t$  неустранимая ошибка, закон изменения которой неизвестен. Считается, что наихудшим законом изменения в смысле роста ошибки прогноза считается равномерный закон. Известные уравнения Колмогорова, в части случаев позволяющие решать подобные задачи аналитически, в подобных ситуациях неприменимы [7]. На практике наличие равномерной ошибки будет означать, что может быть использован любой момент времени между  $t + \Delta t - \delta t$  и  $t + \Delta t + \delta t$ .

Алгоритм идентификации стартует в момент, когда поступает каждая следующая информация вида 1, 2 или 3. Для двухпараметрических функции  $\varphi(t)$  наподобие  $\varphi(t) = a - b \cdot t$  или  $\varphi(t) = 1 - a \cdot \exp(b \cdot t)$  теоретически достаточно 2-х точек для идентификации (3-х, если необходимо оценить ошибку идентификации). Каждая следующая поступившая информация вызывает следующие действия:

1. Для всех видов функции  $\varphi(t)$  определить их коэффициенты, решая задачу (1).
2. Выбрать вид функции с наименьшей ошибкой  $S$ .
3. Произвести прогноз поломки, то есть найти  $t : \varphi(t) = 0$  или, в более общем

случае,  $t: \varphi(t) < G_{min}$ , где  $G_{min}$  - минимальный допустимый уровень готовности для данного ТС.

Пункт 1 алгоритма по-разному выполняется в случае поступления сведений вида 1 (о фактической поломке) или видов 2 и 3 (об экспертном прогнозе поломки). Для сведений вида 1 он описан выше: момент времени принимается таким, какой он есть по факту. Для остальных сведений модифицированный алгоритм выглядит следующим образом (предполагается, что функция  $\varphi(t)$  какого-то вида к моменту поступления сведений вида 2 или 3 уже построена):

1. Найти такое время  $t_1 \in [t + \Delta t - \delta t, t + \Delta t + \delta t]$ , в которое ошибка (1) минимальна для ранее выбранного вида функции.
2. Найти коэффициенты функции, решая задачу  $S = \sum_j (G_{min} - \varphi_i(t_1))^2 \rightarrow \min$
3. Для всех остальных видов функций определить их коэффициенты, решая задачу  $S = \sum_j (G_{min} - \varphi_i(t + \Delta t))^2 \rightarrow \min$ .
4. Выбрать вид функции с наименьшей ошибкой S.
5. Произвести прогноз  $t: \varphi(t) < G_{min}$ .

Проверим работу алгоритма на примере. Будем рассматривать три вида функций изменения коэффициента готовности  $\varphi_1(t) = 1 - b \cdot t$ ,  $\varphi_2(t) = (1 + a) - a \cdot \exp(b \cdot t)$  и  $\varphi_3(t) = \exp(-b \cdot t)$ . Первая описывает линейное снижение готовности от времени, вторая – нарастающее и третья – асимптотически приближающееся к нулю (Рисунок 1).

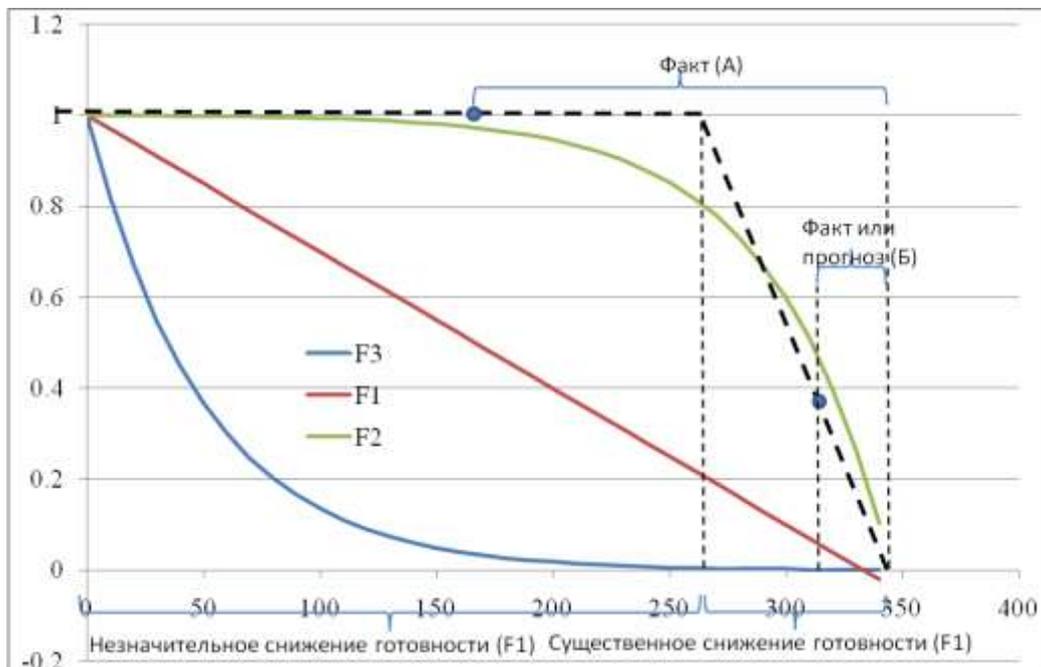


Рисунок 1 – Примеры изменения коэффициента готовности во времени  
 Figure 1 – Examples of readiness changes over time

Пусть, на самом деле, готовность меняется по закону  $\varphi_2(t)$  с коэффициентами  $a=0.001$  и  $b=0.02$ . Покажем работу алгоритма в самом идеальном случае – когда через

равные отсчеты поступает информация о текущем значении коэффициента готовности (например, от не существующего в реальности прогностического оборудования) с заданной погрешностью  $\varepsilon$ . Разумеется, после генерации погрешности окончательное значение приводится к интервалу  $[0,1]$ .

Будем, начиная с 5-го отсчета, выполнять исходный, не модифицированный алгоритм идентификации и контролировать погрешность прогноза гарантированной поломки  $t^* : G_i(t^*) = 0$ . Для этого разработано программное обеспечение в виде VBA-программы MS Excel, реализующее вышеописанный алгоритм. В связи с тем, что задача несложная, поиск решения (1) осуществляется пошаговым спуском с постоянным шагом [8], равным наперед заданной погрешности определения коэффициентов.

Возникают вопросы, каким же должен быть этот шаг, и зависит ли он от исходных условий. Для ответа на них произведено несколько имитационных экспериментов, выясняющих зависимость ошибки идентификации вида функции от шага спуска и погрешности  $\varepsilon$  (Рисунок 2). Так как нам известно, что использована функция 2-го вида, выбор любой другой функции является ошибкой. Далее под «ошибкой» понимается количество исходных точек, которые надо обработать, чтобы идентифицирующий алгоритм начал выдавать только значения 2-го вида.

При каждом шаге спуска и погрешности 20% произведено по 10 экспериментов, так как результат каждый раз получается разным из-за стохастической природы ошибки  $\varepsilon$ .

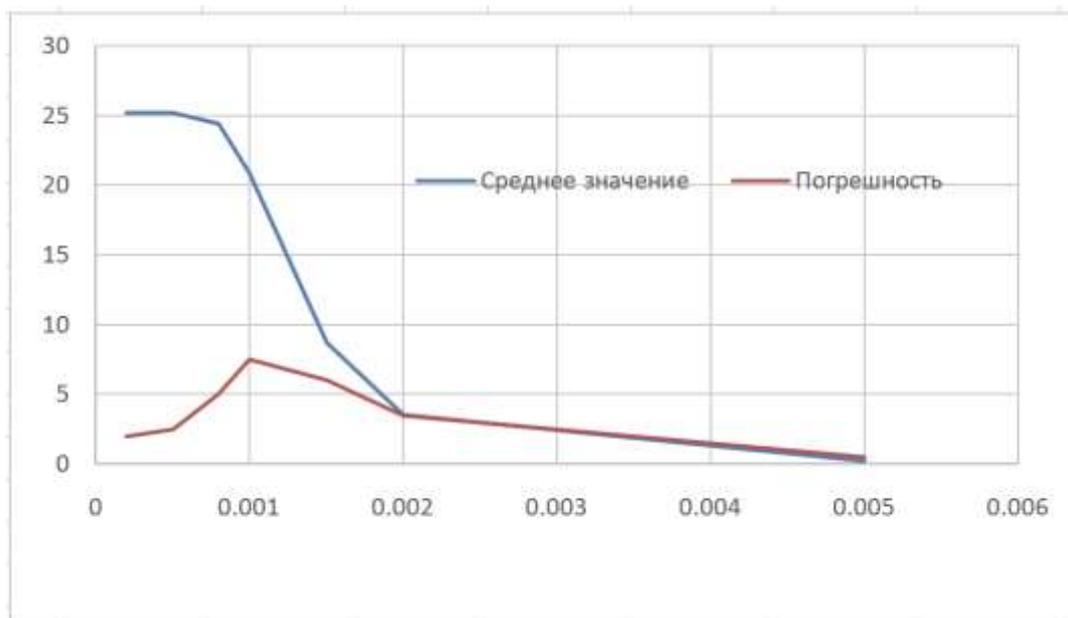


Рисунок 2 – Зависимость ошибки идентификации вида функции от погрешности определения коэффициентов аппроксимирующих функций

Figure 2 – Dependence of type function identification error from error of approximation function coefficients determination

Хорошо заметно, что при шаге менее 0.0008 среднее значение ошибки практически не изменяется, хотя несколько снижается разброс получаемых значений. Поэтому, вероятно, можно использовать шаг 0.0005, не уменьшая его более.

Исследование зависимости ошибки от погрешности диагностики (исунок 3) показало, что при росте погрешности диагностики свыше 25% ошибка, фактически, не изменяется.

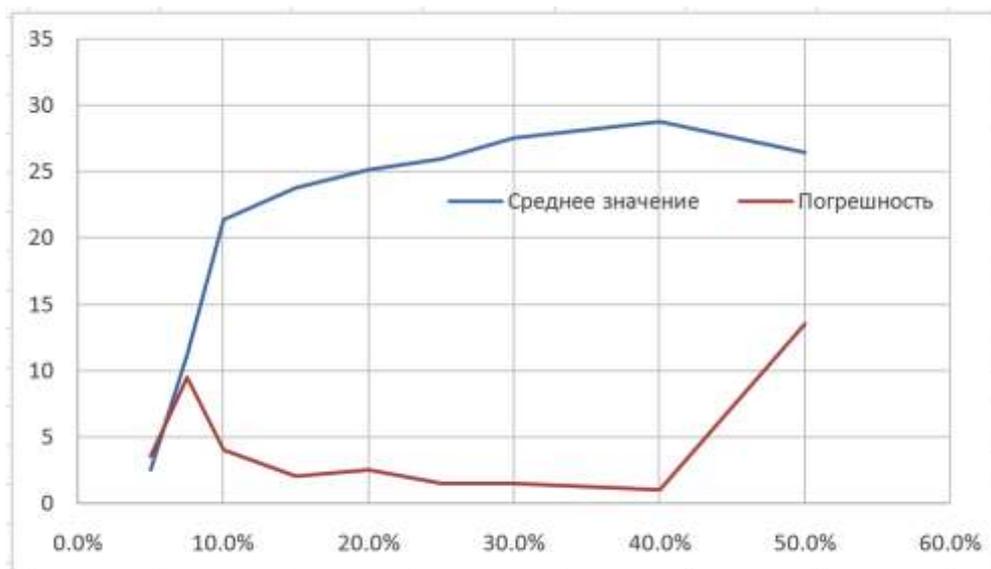


Рисунок 3 – Зависимость ошибки идентификации от погрешности диагностики  
 Figure 3 – Dependence of identification error from error of diagnostics

Следует отметить, что ошибка идентификации  $\pm 50\%$  не является в данном случае чем-то из ряда вон выходящим [9]. Это нормальный прогноз механика «сломается через месяц-два, ну, может, через три», достаточно часто встречающийся на практике.

Таким образом, даже в идеализированном случае, вероятно, нельзя говорить об идентификации параметров тренда коэффициента готовности без наличия 25-30 наблюдений за состоянием ТС. В случае большого автотранспортного предприятия, тем не менее, это вполне достижимая величина, так как однотипные ТС могут в нем насчитываться десятками.

Однако в реальности непрерывное диагностирование ТС вряд ли возможно, даже при помощи упомянутых выше телеметрических датчиков [10]. Чаще всего на практике возникают две области состояний ТС, показанные на Рисунке 1:

- а) ТС внешне исправно, снижение готовности не наблюдается
- б) существенное снижение готовности, которое может быть инструментально или экспертно диагностировано.

Соответственно, и исходная информация о состоянии может быть всего двух видов, также показанных на Рисунке 1:

- а) внешне исправное ранее ТС сломалось (значит, наступление области состояния «б» упущено, и диагностика вовремя не была проведена);
- б) известно, что ТС вошло в область «б», и либо диагностические данные, либо факт поломки определяют время до планового или фактического прекращения эксплуатации.

Здесь практически важно спрогнозировать не только момент прекращения эксплуатации, но и начала области «б» существенного снижения готовности, так как диагностировав причину снижения, можно восстановить готовность ТС мелким ремонтом и не допустить внезапного выхода из эксплуатации, невыполнения заданий на перевозку и снижения доходности. Кроме того, в ряде случаев мелкий ремонт может предотвратить необходимость последующего крупного ремонта, то есть снизить непосредственные ремонтные затраты. Такой эффект возникает, так как агрегаты автомобиля инцидентны, и поломка одного часто вызывает последовательные поломки по графу соединения агрегатов. Так, чрезмерный износ карданных соединений

потенциально может вызвать повреждения коробки скоростей, сцепления или мостовых редукторов [11].

Рассмотрим аппроксимацию функции тренда готовности  $\varphi_2(t) = (1+a) - a \cdot \exp(b \cdot t)$  двумя прямыми  $f_1(t) = 1$  и  $f_2(t) = 1 - c \cdot t$  так, чтобы среднеквадратичная невязка между ними была минимальной. Обозначив момент наступления существенного снижения (начала аппроксимирующей функции  $f_2$ ) через  $t_2$ , получим задачу оптимизации

$$(t_2, c) : R = \int_0^{t_2} ((1+a) - a \cdot \exp(b \cdot t) - 1)^2 dt + \int_{t_2}^t ((1+a) - a \cdot \exp(b \cdot t) - (1 - c \cdot t))^2 dt \rightarrow \min \quad (2)$$

Для рассматриваемого интервала значений с достаточной точностью ( $\pm 15 \dots 20\%$ ) в качестве решения этой задачи можно использовать квадратичные аппроксимации (Рисунок 4):

$$t_2(a, b) = 504.04 - 232.45a - 15377b - 0.1355a^2 - 171.614b^2$$

и

$$c(a, b) = -0.068116 - 0.12949a + 6.90920b - 0.007597a^2 - 158.596b^2.$$

Добиваться бóльшей точности нет необходимости, так как выше обосновывалась ординарная погрешность самой диагностики в пределах  $\pm 35 \dots 50\%$ . Аппроксимации получены путем поиска решения задачи (2) по набору данных, полученному в результате имитационного моделирования трендов технической готовности и их кусочно-линейных аппроксимаций  $f_1$  и  $f_2$ .



Рисунок 4 – Сравнение расчетных значений  $t_2$  с полученными в ходе вычислительного эксперимента (по оси абсцисс – номер эксперимента)

Figure 4 – Comparison of estimated  $t_2$  values with ones obtained by numerical experiment (abscissa is experiment number)

Обратная задача, разумеется, также имеет простое квадратичное решение.

### Результаты и обсуждение

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы:

1. Для успешной оперативной идентификации коэффициента технической готовности ТС автопарка необходимы десятки (не менее 25...30) диагностических или экспертных прогнозов, желательных, попадающих в область существенного снижения готовности (в терминах, использованных на Рисунке 1).

2. По данным идентификации можно определить и использовать в целях поддержки управленческих решений расчетное время  $t_2$ , в течение которого эксплуатация ТС, скорее всего, окажется бесперебойной. После достижения этого времени эксплуатации необходимо ставить вопросы о проведении углубленной диагностики и мелких ремонтов, предотвращающих, возможно, крупные и дорогостоящие ремонты в будущем.

То есть, исследование динамики технической готовности в условиях крупного автотранспортного предприятия является вполне работоспособным инструментом в отношении оптимизации затрат предприятия.

### Заключение

Описанный подход к идентификации технической готовности автотранспортных и технологических машин крупного автотранспортного предприятия основан на сборе и обработке статистической информации об отказах в работе транспортных средств, что позволяет, принимать обоснованные решения о заблаговременном выводе транспортных и технологических машин в ремонт соответствующего вида и позволяет отказаться от планового ремонта машин. Переход от системы планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по техническому состоянию особенно важен при составлении плана выполнения производственной программы предприятия на территориально удаленных объектах. Ведет к повышению эффективности деятельности предприятия и к менее затратному решению задач, поставленных в рамках крупных государственных проектов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенова З.И., Бачурин А.А. *Анализ производственно-финансовой деятельности автотранспортных предприятий*. М.: Транспорт. 2008:255.
2. Drury С.М. *Management and cost accounting*. Luxembourg: Springer. 2013:874. DOI: 10.1007/978-1-4899-6828-9.
3. Салих Х.С., Егоров С.Я., Затонский А.В., Фелькер М.Н. Постановка задачи определения технической готовности подвижного состава автотранспортного предприятия. *ООО Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: «Естественные и технические науки»* 2020; 2.
4. Агеева Е.В., Сабельников Б.Н., Щербаков А.В., Пыхтин А.И. Повышение эффективности процесса технической эксплуатации транспортных средств за счет применения метода дистанционной диагностики. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2018;22,6(81):6-13.
5. Wróbel, R. , Andrych-Zalewska, M. , Dimitrov, R. Diagnostic telemetry system *Journal of KONES*. 2016; 23(4): 569-574. DOI:10.5604/12314005.1217306.
6. Затонский А.В., Беккер В.Ф., Плехов П.В. Внешние связи информационной модели системы управления техническим состоянием оборудования. *Современные наукоемкие технологии*. 2009;7:78-79.
7. Zatonskiy A.V. Verification of Kolmogorov equation usability for reproduction and death processes. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2019;19(3): 60-67. DOI: 10.14529/ctcr190306.

8. Кожин А.П. *Математические методы в планировании и управлении грузовыми автомобильными перевозками*. М.: Высш. шк. 2005:201.
9. Квятковская И.Ю. Система управления региональным транспортным кластером. *Датчики и системы*. 2009; 5:7-11.
10. Кирич Ю.П., Затонский А.В., Беккер В.Ф. Построение моделей динамики сложных технологических объектов в позиционных системах управления *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2009;3(27):25-28.
11. Громов Н.Н., Персианов В.А. *Управление на транспорте*. М.:Транспорт. 2015:336.

## REFERENCES

1. Aksenova Z.I., Bachurin A.A. Analiz proizvodstvenno-finansovo-y deyatel'nosti avtotransportnykh predpriyati-y. M.: Transport. 2008:255.
2. Drury C.M. Management and cost accounting. Luxembourg: Springer. 2013:874. DOI: 10.1007/978-1-4899-6828-9.
3. Salih H.S., Egorov S.Ya., Zatonskiy A.V., Fel'ker M.N. Statement of the problem of determining the technical availability of the motive power of automobile operating company. *Seriya: «Estestvennye i tekhnicheskie nauki»* 2020; 2.
4. Age-yeva E.V., Sabel'nikov B.N., SHCHerbakov A.V., Pykhtin A.I. Povysheni-yye effektivnosti protsessa tekhnicheskoy ekspluatatsii transportnykh sredstv za schet primeneniya metoda distantsionno-y diagnostiki. *Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018;22,6(81):6-13.
5. Wróbel, R. , Andrych-Zalewska, M. , Dimitrov, R. Diagnostic telemetry system *Journal of KONES*. 2016; 23(4): 569-574. DOI:10.5604/12314005.1217306.
6. Zatonskiy A.V., Bekker V.F., Plekhov P.V. Vneshni-yye svyazi informatsionno-y modeli sistemy upravleniya tekhnicheskim sostoyani-yyem oborudovaniya. *Sovremenny-yye nauko-yyemki-yye tekhnologii*. 2009;7:78-79.
7. Zatonskiy A.V. Verification of Kolmogorov equation usability for reproduction and death processes. *Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuterny-yye tekhnologii, upravleni-yye, radioelektronika*. 2019;19(3): 60-67. DOI: 10.14529/ctcr190306.
8. Kozhin A.P. Matematicheski-yye metody v planirovanii i upravlenii gruzovymi avtomobil'nymi perevozkami. M.: Vyssh. shk. 2005:201.
9. Kvyatkovskaya I.YU. Sistema upravleniya regional'nym transportnym klasterom. *Datchiki i sistemy*. 2009; 5:7-11.
10. Kirin YU.P., Zatonski-y A.V., Bekker V.F. Postro-yyeni-yye modele-y dinamiki slozhnykh tekhnologicheskikh ob''-yyektov v pozitsionnykh sistemakh upravleniya *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2009;3(27):25-28.
11. Gromov N.N., Persianov V.A. *Upravleniyye na transporte*. M.:Transport. 2015:336.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Салих Хайдер Сабах** соискатель ученой степени кандидата наук, прикреплен к Тамбовскому государственному техническому университету, Тамбов, Российская Федерация, e-mail: [hayder85\\_eng@yahoo.com](mailto:hayder85_eng@yahoo.com)

**Sabah H. Salih**, Competitor of a Scientific Degree of Candidate of Sciences, is Attached to Tambov State Technical University of Russia, Tambov, Russian Federation

**Егоров Сергей Яковлевич**, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», доктор технических наук, доцент, Тамбов, Российская Федерация, e-mail: [egorovsy@yandex.ru](mailto:egorovsy@yandex.ru)  
ORCID: [0000-0003-1921-8002](https://orcid.org/0000-0003-1921-8002)

**Sergey Y. Egorov**, Professor of Department of Computer-integrated Systems in Mechanical Engineering Tambov State Technical University, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Tambov, Russian Federation

**Затонский Андрей Владимирович** профессор кафедры «Автоматизация технологических процессов» Березниковского филиала ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», доктор технических наук, доцент, Березники, Пермский край, Российская Федерация, e-mail: [zxeon2000@yandex.ru](mailto:zxeon2000@yandex.ru)  
ORCID: [0000-0003-1863-2535](https://orcid.org/0000-0003-1863-2535)

**Andrey V. Zatonskiy**, Professor of Department of Automation of technology processes in Perm National Research Polytechnic university, Berezniki branch, Doctor of Technical Sciences, Professor, Berezniki, Perm region, Russian Federation

**Плехов Павел Владимирович** доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов» Березниковского филиала ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кандидат технических наук, Березники, Пермский край, Российская Федерация

**Pavel V. Plekhov**, Associate Professor of Department of Automation of technology processes in Perm National Research Polytechnic university, Berezniki branch, Candidate of Technical Sciences, Berezniki, Perm region, Russian Federation