

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ РЕЗЕРВА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН РАЗЛИЧНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Грушецкий С.М., Васильев Я.В., Дедков И.Г., Гусева А.В., Андроненков П.Р.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург

Ключевые слова: система оценки резерва выполнения работ, производительность, наземные транспортно-технологические машины, адаптивное управление, машинное обучение, эксплуатационная эффективность.

Аннотация. Статья посвящена разработке комплексной системы оценки резерва выполнения работ с целью адаптивного управления производительностью разнородных наземных транспортно-технологических машин. Предлагается единый математический аппарат, ключевым элементом которого является интегральный показатель – мера резерва $R(t)$. Данный показатель динамически объединяет и оценивает совокупный потенциал системы, включая технические возможности оборудования, изменчивые эксплуатационные условия и организационно-производственные факторы. Аппарат реализует две ключевые функции: интегральную диагностику текущего состояния и ситуационное адаптивное управление, направленное на максимизацию резерва. Система основана на модели машинного обучения для прогнозирования производительности и включает адаптивный алгоритм настройки параметра штрафа за отклонения от плана с использованием фильтра Калмана и градиентного спуска. Приведены результаты апробации системы оценки резерва выполнения работ на различных типах наземных транспортно-технологических машин (роботизированные бетоноукладочные машины, дорожные фрезы, экскаваторы).

COMPREHENSIVE WORK RESERVE ASSESSMENT SYSTEM FOR MANAGING THE PERFORMANCE OF GROUND TRANSPORTATION AND TECHNOLOGICAL MACHINES OF VARIOUS FUNCTIONAL PURPOSES

Grushetsky S.M., Vasiliev Ya.V., Dedkov I.G., Guseva A.V., Andronenkov P.R.
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg

Keywords: work reserve assessment system, productivity, ground transportation and technological machines, adaptive control, machine learning, operational efficiency.

Abstract. The article is devoted to the development of a comprehensive system for assessing the reserve of work for the purpose of adaptive performance management of heterogeneous ground transport and technological machines. A single mathematical apparatus is proposed, the key element of which is an integral indicator – a measure of the reserve $R(t)$. This indicator dynamically combines and evaluates the total potential of the system, including the technical capabilities of the equipment, changing operating conditions and organizational and production factors. The device implements two key functions: integrated diagnostics of the current state and situational adaptive management aimed at maximizing the reserve. The system is based on a machine learning model for predicting performance and includes an adaptive algorithm for adjusting the penalty parameter for deviations from the plan using the Kalman filter and gradient descent. The results of testing a system for assessing the reserve of work performed on various types of ground-based transport and technological machines (robotic concrete-laying machines, road cutters, excavators) are presented.

Введение

Современная строительная отрасль, в условиях роста объемов инфраструктурных проектов и ужесточения сроков их реализации, переживает этап активной цифровой трансформации, ориентированной на принципы Индустрии 4.0. В этих условиях оптимизация работы наземных транспортно-технологических машин (НТТМ) становится критически важной задачей, которая предполагает переход от систем пассивного мониторинга работы НТТМ к созданию киберфизических систем, способных на предиктивную аналитику и

реализацию адаптивных управляющих воздействий в реальном времени. Ключевым трендом в этом направлении является разработка интеллектуальных систем управления производительностью, обеспечивающих не только сбор данных, но и их аналитическую обработку для оперативного принятия решений. Однако существующие подходы к оценке эффективности и управлению производительностью парков НТТМ, включая роботизированные бетоноукладочные машины (РБМ), дорожные фрезы (ДФ) и землеройную технику, носят зачастую разрозненный и узкоспециализированный характер. Они фокусируются на оптимизации отдельных параметров (например, реологических свойств смеси для РБМ или режимов резания для ДФ) без учета комплексного взаимодействия технических возможностей оборудования, изменчивых условий эксплуатации и организационных производственных факторов. Таким образом, возникает методологический пробел в создании унифицированного инструментария, который позволил бы осуществлять интегральную оценку текущего состояния и потенциала разнородных машин для гарантированного выполнения плановых объемов работ.

Анализ литературных данных и постановка проблемы

Вопросы повышения эффективности производственной эксплуатации наземных транспортно-технологических машин широко рассматривались в [1]. Теоретические и практические вопросы применения машинного обучения в задачах оценки эффективности применения НТТМ на примере РБМ изложены в [2]. Методические основы формирования аппарата комплексной системы оценки резерва выполнения работ (СОРВ) ранее также были изложены в [3]. При этом ранее применительно к производственной эксплуатации НТТМ и их комплексов управление и прогнозирование выполнения объемов работ не рассматривало возможности более сложного учета влияния фактических условий эксплуатации. Таким образом, применение аппарата оценки резерва выполнения работ, объединяющего в себе анализ больших объемов данных, машинное обучение, является актуальным и перспективным направлением для повышения эффективности строительных процессов, снижения затрат и улучшения качества управления ресурсами.

Вместе с тем, современные исследования в области фрезерования асфальтобетонных покрытий подтверждают фундаментальную роль параметров процесса, таких как глубина резания, скорость подачи и частота вращения барабана, на силовые нагрузки, износ инструмента и производительность, при этом введение предварительного нагрева (термопрофилирования) теоретически обосновано: снижение вязкости битумного вяжущего должно приводить к уменьшению сопротивления резанию и, как следствие, к снижению износа резцов и росту производительности, что также подтверждается аналогичными процессами в металлообработке.

Однако традиционные математические модели, описывающие эти процессы, обычно основаны на упрощающих допущениях и линейных или полиномиальных зависимостях [4-8]. Такие модели часто не в состоянии адекватно описать сложные физические взаимодействия, особенно в условиях, когда на процесс одновременно влияет множество переменных. Например, сила резания зависит не только от глубины резания и скорости подачи, но и от степени износа инструмента, угла атаки, вязкости разрушения асфальтобетона и, в случае термопрофилирования, от температуры разогрева и ее градиента по глубине. Эти факторы могут взаимодействовать нелинейно, создавая эффекты, которые трудно уловить с помощью стандартных регрессионных подходов.

В последние годы в инженерных науках началось активное внедрение методов машинного обучения для решения подобных задач. Алгоритмы, такие как искусственные нейронные сети (ANN), метод опорных векторов (SVM) и ансамбли деревьев решений, показали высокую эффективность в прогнозировании сложных технических параметров [9-10]. Среди ансамблевых методов особое место занимают Random Forest (RF) и Gradient Boosting Machines (GBM).

Таким образом, анализ литературы показывает, что указанные исследования развиваются параллельно, в рамках своих предметных областей. Таким образом, на

настоящий момент отсутствует обобщающая методика, которая синтезировала бы эти передовые наработки в единую систему, способную количественно определять достаточность совокупных ресурсов (технических, эксплуатационных, организационных) для выполнения требуемого объема в заданных условиях и на заданную перспективу.

Следовательно, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью преодоления фрагментарности существующих подходов и разработки комплексной СОРВ. Новая система должна основываться на универсальном математическом аппарате, применимом к различным классам НТТМ, и выполнять две ключевые функции: 1) интегральную диагностику текущего состояния и потенциала системы на основе динамической меры резерва, объединяющей показатели производительности, технического состояния и соответствия плану; 2) ситуационное адаптивное управление, предоставляющее рекомендации или автоматически реализующее управляющие воздействия для максимизации этого резерва и обеспечения выполнения производственной программы.

Материалы и методы

Математический аппарат комплексной системы оценки резерва выполнения работ для управления производительностью НТТМ различного функционального назначения, может быть описан следующим образом:

1.1. Базовая модель производительности. Фактическая производительность для любого типа НТТМ описывается универсальным уравнением вида:

$$Q_{\text{факт}}(t) = f(T, E, P) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $Q_{\text{факт}}(t)$ – фактическая производительность в момент времени t ; $f(\)$ – функция отклика, обученная на исторических данных (нейросетевая/регрессионная модель); T – вектор технических параметров машины; E – вектор эксплуатационных условий; P – вектор производственных факторов; $\varepsilon(t)$ – случайная погрешность (шум измерений, внешние возмущения).

1.2. Декомпозиция факторов влияния. Каждый вектор параметров раскладывается на взвешенную сумму составляющих:

Технические параметры (специфические для конкретной НТТМ):

$$f_T = \sum_{i=1}^n a_i T_i, \quad (2)$$

где T_i – i -й технический параметр (например, для РБМ: диаметр сопла D [мм], скорость укладки v [мм/с]; для ДФ: частота вращения n [об/мин], глубина резания h [мм]; для экскаватора: объем ковша V [м³]); a_i – весовой коэффициент значимости параметра (определяется методом главных компонент или экспертной оценкой); n_T – количество учитываемых технических параметров.

Эксплуатационные условия (внешняя среда):

$$f_E = \sum_{j=1}^n b_j E_j, \quad (3)$$

где E_j – j -й эксплуатационный параметр (например: для бетона (укладка РБМ слоев стеновой конструкции с линейным путем): предельное напряжение сдвига τ_0 [Па], пластическая вязкость μ [Па·с]; для асфальта (при термопрофилировании): температура разогрева $T_{\text{нагр}}$ [°C], вязкость разрушения; для грунта (копание траншей экватором): угол внутреннего трения φ [град], влажность w [%]); b_j – весовой коэффициент влияния условия (зависит от чувствительности процесса к данному фактору); n_E – количество учитываемых эксплуатационных параметров.

Производственные факторы (организационные):

$$f_P = \sum_{k=1}^n c_k P_k, \quad (4)$$

где P_k – k -й производственный фактор (например: плановый объем работ $V_{\text{план}}$ [м³], количество смен $N_{\text{см}}$, квалификация оператора (баллы), наличие вспомогательных

механизмов и т.д.); c_k – весовой коэффициент организационного фактора (отражает влияние на общую эффективность) и n_P – количество учитываемых производственных параметров.

1.3. Потенциал системы (нормированный показатель готовности). Потенциал системы $F(t)$ – это интегральный показатель, характеризующий совокупную возможность машины выполнять работы в текущих условиях:

$$F(t) = \alpha \cdot f_T + \beta \cdot f_E + \gamma \cdot f_P, \quad (5)$$

где α, β, γ – глобальные весовые коэффициенты ($\alpha + \beta + \gamma = 1$), определяющие приоритетность групп факторов: α – техника, β – среда, γ – организация.

При этом $F(t)$ может находиться: 1,0 – номинальный режим, $>1,0$ – резерв, $<1,0$ – дефицит.

1.4. Коэффициент выполнения работ. Коэффициент выполнения $k(t)$ – это отношение фактической производительности к плановой:

$$k(t) = \frac{Q_{\text{факт}}(t)}{Q_{\text{план}}(t)}. \quad (6)$$

Физическая интерпретация: $k(t)=1,0$ – работа идет строго по плану (идеальный случай); $k(t)<1,0$ – недовыполнение (причины: отказы, плохие условия, низкая квалификация); $k(t)>1,0$ – перевыполнение (может вести к перегрузке и ускоренному износу).

1.5. Ядро системы – мера резерва выполнения работ. Мера резерва $R(t)$ – это интегральный показатель, объединяющий потенциал системы и качество выполнения плана:

$$R(t) = F(t) \cdot \frac{k(t)}{1 + \gamma(t) \cdot |k(t) - 1|}, \quad (7)$$

где $\gamma(t)$ – адаптивный параметр штрафа, а именно динамически меняющийся «штраф» за отклонение от плана.

При этом, мера резерва $R(t)$ может иметь значения: 0,9-1,0 – отличный резерв; 0,7-0,9 – удовлетворительный; менее 0,6 – критический.

1.6. Адаптивный параметр штрафа $\gamma(t)$. Параметр $\gamma(t)$ адаптируется в реальном времени по двум механизмам:

– фильтр Калмана (краткосрочная адаптация):

$$\gamma_{\text{Калман}}(t) = \gamma(t-1) + K(t) \cdot [z(t) - H \cdot \gamma(t-1)], \quad (8)$$

где $K(t)$ – коэффициент усиления Калмана, $z(t)$ – измерения, H – матрица наблюдений.

– градиентный спуск (долгосрочная оптимизация):

$$\gamma(t+1) = \gamma(t) - \eta \nabla J(\gamma(t)), \quad (9)$$

где η – скорость обучения, J – функция потерь (минимизация отклонений $|k(t) - 1|$).

Физический смысл $\gamma(t)$: $\gamma(t) \approx 0,5$ – система «лояльна» к отклонениям (начало работ, обучение); $\gamma(t) \approx 1,0$ – нормальный режим; $\gamma(t) > 1,5$ – система «строго штрафует» за отклонения (ответственные этапы, ограниченные сроки).

1.7. Формализация рабочей ситуации. Вектор состояния системы в момент времени t :

$$S(t) = \begin{bmatrix} Q_{\text{факт}}(t) \\ R(t) \\ T(t) \\ E(t) \\ P(t) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $T(t) = [T_1, T_2, \dots, T_{nT}]^T$ – вектор технических параметров; $E(t) = [E_1, E_2, \dots, E_{nE}]^T$ – вектор условий эксплуатации; $P(t) = [P_1, P_2, \dots, P_{nP}]^T$ – вектор производственных факторов.

1.8. Аппарат принятия решений (ситуационное управление). Оптимальное управляющее воздействие (оптимальное управление в момент t) выбирается как:

$$U^*(t) = \arg \max_{a \in A} E[R(t+1)|S(t), a], \quad (11)$$

где A – множество допустимых управлений (например: для РБМ: {изменить скорость укладки, сменить сопло, активировать вибрацию}; для ДФ: {изменить температуру нагрева,

скорректировать скорость подачи}); для экскаватора: {изменить угол резания, увеличить усилие}); $E[\]$ – математическое ожидание (учет вероятностного характера процесса); $R(t+1)$ – прогнозируемое значение меры резерва (рассчитывается по модели на шаг вперед).

2. Физическая интерпретация математического аппарата.

2.1. Физический смысл меры резерва $R(t)$ можно формализовать в качестве аналогии с коэффициентом полезного действия (КПД), но для сложной системы «машина-среда-организация», отражающим произведение потенциала на эффективность использования.

2.2. Геометрическая интерпретация. В пространстве параметров «потенциал – коэффициент выполнения – мера резерва» (F, k, R) система будет описываться гиперповерхностью эффективности. При этом, точка ($F = 1, k = 1, R = 1$) является глобальным максимумом. Соответственно система управления должна стремиться удерживать рабочую точку в окрестности этого максимума.

3. Практическая реализация в обобщенном виде основывается на следующем алгоритме работы СОПВ: сбор данных: T_i, E_j, P_k с датчиков и систем мониторинга; расчет: $Q_{факт}(t), F(t), k(t)$; адаптация: обновление $\gamma(t)$ по фильтру Калмана; оценка: вычисление $R(t)$; прогноз: $\hat{R}(t+1)$ по модели; управление: выбор $U^*(t)$ из A ; коррекция: обучение модели по результатам.

Блок-схема реализации изложенного математического аппарата в СОПВ в обобщенном виде показана на рисунке 1.

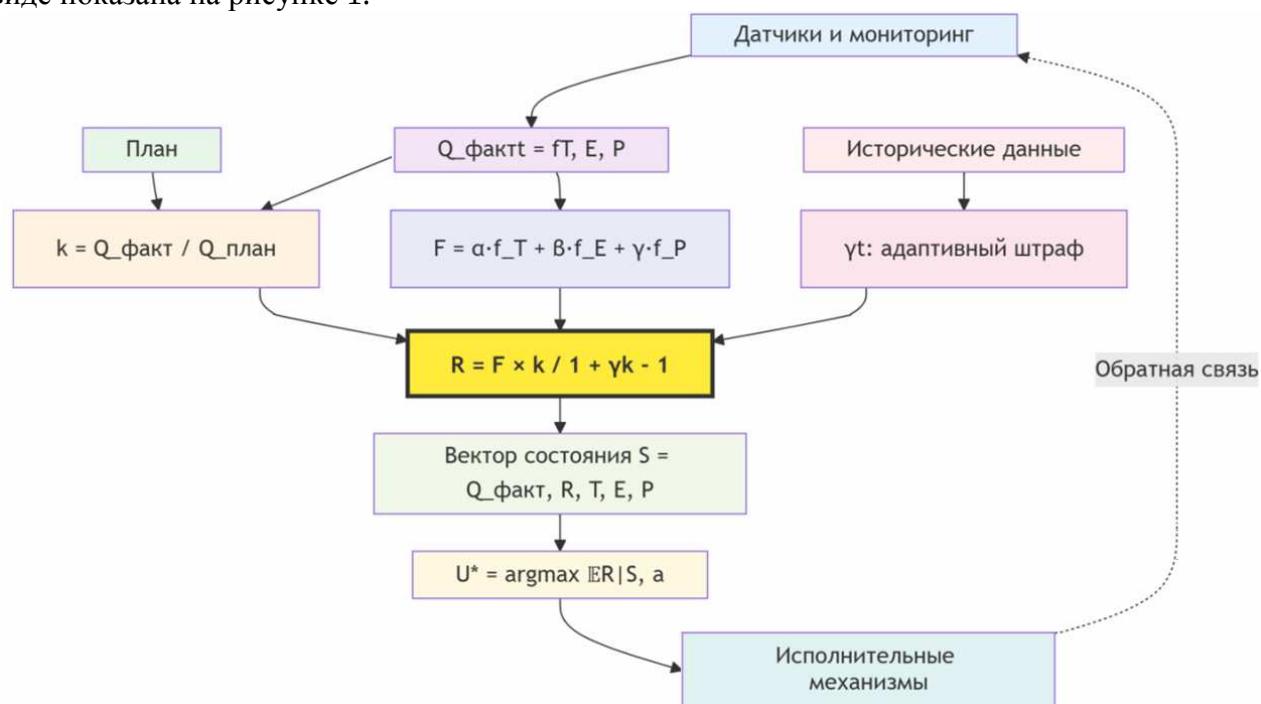


Рис. 1. Блок-схема представленного математического аппарата СОПВ в обобщенном виде

Представленный математический аппарат СОПВ обладает следующими преимуществами: универсальность (формирует единую структуру для разных типов НТТМ); адаптивность (параметр $\gamma(t)$ настраивается под конкретные условия); практическая реализуемость (показанная СОПВ пригодна для встраивания в системы реального времени) и масштабируемость (аппарат легко расширяется на новые типы машин и факторов).

При этом, общие принципы адаптивного управления при применении СОПВ могут сформулированы как:

1. Приоритет воздействий: в критических зонах - безопасность и предотвращение отказов; в оптимальных зонах - максимизация производительности.

2. Постепенность изменений: корректировка параметров осуществляется ступенчато с контролем результатов на каждом шаге.

3. Обратная связь в реальном времени: непрерывный мониторинг реакции системы на управляющие воздействия.

4. Прогнозирование и превентивность: использование исторических данных для предсказания развития ситуаций и упреждающих действий.

5. Интеграция с производственными системами: согласование управляющих воздействий с общими планами работ и доступностью ресурсов.

Рассмотрим стратегии управления для исследуемых в данной статье НТТМ в зависимости от меры резерва $R(t)$. Для РБМ, основным принципом является: управление стабильностью процесса экструзии, стратегии управления для РБМ показаны в таблице 1.

Стратегии управления для дорожных фрез (ДФ), показаны соответственно в таблице 2, основным принципом при этом является: управление износом режущего инструмента и энергоэффективностью.

Табл. 1. Стратегии управления для РБМ

Зона меры резерва	Характеристика	Стратегии управления
Критическая зона: $R(t) < 0,6$	Значительные отклонения в процессе укладки, высокий риск дефектов конструкции	Коррекция реологических параметров: оперативная настройка состава бетонной смеси для достижения оптимального предела текучести τ_0 (180-200Па) и пластической вязкости μ (26-45Па·с). Оптимизация скорости экструзии: снижение скорости укладки на 30-40% до 20-50мм/с для восстановления стабильности потока материала. Диагностика и очистка сопла: проведение автоматического цикла виброочистки, проверка геометрии сопла на предмет деформаций или засорений. Коррекция траектории движения: упрощение пространственной траектории, замена сложных криволинейных участков на линейные с радиусом кривизны не менее 3 м
Зона оптимизации: $0,6 \leq R(t) < 0,8$	Стабильный процесс с возможностями для повышения эффективности	Настройка траектории движения: оптимизация пространственных траекторий с использованием сплайнов 3-го порядка для минимизации центробежных сил. Балансировка вибрационных параметров: коррекция амплитуды и частоты вибровозбудителя ($A_v=0,5-2,0$ мм, $\omega_v=20-100$ Гц) для улучшения уплотнения без нарушения целостности слоев. Контроль температурного режима: поддержание температуры бетонной смеси в диапазоне 15-25°C через регулировку времени транспортировки и условий хранения. Адаптация скорости укладки: постепенное увеличение скорости до 80-120мм/с при сохранении качества экструзии.
Зона стабильной работы: $R(t) \geq 0,8$	Оптимальные условия для максимальной производительности	Максимальная производительность: поддержание скорости укладки на уровне 120-150мм/с с круглым соплом диаметром 60мм. Проактивный мониторинг качества: непрерывный контроль геометрической точности укладки с допустимыми отклонениями $\Delta h \leq 1,5$ мм. Стабилизация реологических параметров: использование пластификаторов для поддержания стабильного предела текучести $\tau_0=180 \pm 10$ Па. Превентивное обслуживание: планирование очистки сопла и проверки систем вибрации через каждые 4-6 часов непрерывной работы.

Табл. 2. Стратегии управления для ДФ

Зона меры резерва	Характеристика	Стратегии управления
Критическая зона: $R(t) < 0,5$	Интенсивный износ резцов, повышенная энергоемкость, риск повреждения оборудования	Замена изношенных резцов: автоматическое оповещение о необходимости замены при степени износа $> 80\%$, планирование остановки на 15-20 минут для замены комплекта резцов. Коррекция глубины резания: снижение глубины резания на 30-50% до 20-40 мм для уменьшения механической нагрузки. Оптимизация термопрофилирования: увеличение температуры предварительного нагрева до 65-80°C для снижения сопротивления резанию на 25-30%. Проверка систем охлаждения: контроль расхода охлаждающей жидкости, очистка форсунок, поддержание температуры инструмента $\leq 60^\circ\text{C}$.

Табл. 2. Продолжение

Зона меры резерва	Характеристика	Стратегии управления
Зона оптимизации: $0,5 \leq R(t) < 0,75$	Стабильный процесс фрезерования с потенциалом оптимизации	Оптимизация скорости подачи: Корректировка скорости в диапазоне 4-8м/мин в зависимости от типа асфальтобетона (ЩМА-20, ЩМА-15, АБ-16 Г, АБ-20 Г). Контроль температурного режима: Поддержание температуры разогрева в оптимальном диапазоне 50-65°C для баланса между снижением износа и энергозатратами. Балансировка нагрузки: Равномерное распределение нагрузки между резцами через коррекцию частоты вращения барабана (120-180об/мин). Мониторинг силы резания: Поддержание силы резания в диапазоне 15-25кН через адаптацию режимных параметров.
Зона стабильной работы: $R(t) \geq 0,75$	Максимальная эффективность фрезерования при минимальном износе	Оптимальный режим фрезерования: Поддержание скорости подачи 6-8м/мин при глубине резания 50-60мм с частотой вращения 150-180об/мин. Максимальная производительность: Достижение производительности 350-450м³/ч при удельной энергоёмкости $\leq 85 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ м}^2$. Превентивный контроль износа: Прогнозирование остаточного ресурса резцов с точностью $\pm 5\%$, планирование замены за 2-3 часа до критического износа. Стабилизация качества поверхности: Обеспечение шероховатости обработанной поверхности $R_z = 2-4 \text{ мм}$ через контроль равномерности фрезерования.

И аналогично, стратегии управления для землеройной техники, на примере одноковшовых экскаваторов, показаны в таблице 3. Основной принцип для данного вида НТТМ: оптимизация рабочих циклов и производительности.

Табл. 3. Стратегии управления для землеройной техники

Зона меры резерва	Характеристика	Стратегии управления
Критическая зона: $R(t) < 0,55$	Низкая эффективность циклов, повышенный расход топлива, значительные простои	Оптимизация рабочих циклов: Анализ и реструктуризация последовательности операций (копание-транспортировка-разгрузка-возврат) для минимизации холостых ходов. Коррекция маршрута движения: Перепланирование траекторий перемещения с учетом рельефа местности и расположения объектов для сокращения пути на 15-20%. Диагностика гидравлических систем: Проверка давления в гидросистеме (17-21МПа), контроль утечек, тестирование производительности насосов. Оптимизация наполнения ковша: Коррекция угла атаки и глубины копания для достижения коэффициента наполнения 0,85-0,95
Зона оптимизации: $0,55 \leq R(t) < 0,8$	Стабильная работа с возможностями для повышения эффективности	Балансировка нагрузки ковша: Автоматическая коррекция объема грунта в ковше в зависимости от его плотности и влажности (1,2-1,8т/м³). Оптимизация времени цикла: Сокращение времени полного цикла до 25-35 секунд через синхронизацию операций и минимизацию пауз. Контроль состояния грунта: Адаптация режимов работы к изменению характеристик грунта (песок, суглинок, глина) через анализ усилий копания. Управление энергопотреблением: Оптимизация расхода топлива через контроль оборотов двигателя и использование режимов Есо при транспортировке.
Зона стабильной работы: $R(t) \geq 0,8$	Пиковая производительность при оптимальном использовании ресурсов	Максимальная эффективность работы: Достижение производительности 180-220м³/ч при коэффициенте использования машины $\geq 0,85$. Стабилизация темпа работ: Поддержание равномерного ритма работы с отклонениями по времени цикла $\leq \pm 10\%$. Мониторинг расхода топлива: Контроль удельного расхода топлива в диапазоне 8-12л/час·м³, оптимизация через выбор оптимальных передач. Проактивное техническое обслуживание: Планирование ТО на основе моточасов и фактической нагрузки, предотвращение внеплановых простоев.

Эти стратегии образуют комплексную систему управления, которая позволяет адаптивно реагировать на изменения условий эксплуатации и поддерживать производительность НТТМ на оптимальном уровне.

Таким образом, указанные ключевые принципы применения стратегий отражают:

- 1. Взвешенность изменений, а именно: корректировка не более 1-2 параметров одновременно; шаг изменения параметров: 10-20% от текущего значения; время стабилизации после коррекции: 15-30 минут.
- 2. Приоритетность воздействий, а именно: постоянное следование цепи: Безопасность → Качество → Производительность → Экономичность, в частности при низких значениях $R(t)$: безопасность и предотвращение отказов, при высоких значениях $R(t)$: максимизация экономических показателей.

Результаты и обсуждение

Изложенный математический аппарат был применен для рассматриваемых видом НТТМ (РБМ, ДФ и землеройная техника, на примере одноковшовых экскаваторов) при использовании данных по разработанных авторским коллективом программных имитационных комплексам, показанным в [1-3], а также при использовании данных по фактической эксплуатации НТТМ, полученных в ходе натурных наблюдений также ранее показанных в [1-3].

Пример динамики изменения меры резерва по видам НТТМ за 30 дней сентября 2024 года по натурным наблюдениям (РБМ – малое коттеджное строительство в Московской обл., ДФ – реконструкция участка Гостилицкого шоссе в Ленинградской обл. и одноковшовые экскаваторы – устройство траншей под газопровод, Краснодарский край) показаны на рисунке 2.

Сравнительный анализ эффективности внедрения системы оценки резерва выполнения работ (на период 3-го квартала 2024) для рассматриваемых типов НТТМ представлен на рисунке 3.

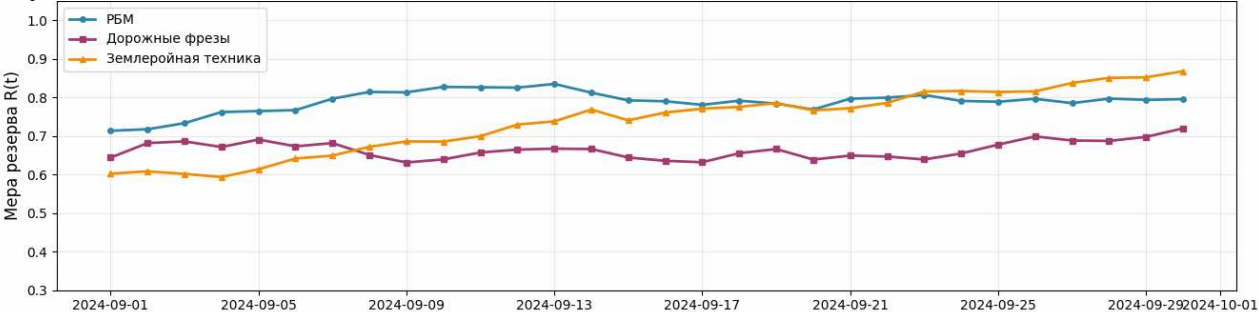


Рис. 2. Пример динамики меры резерва по натурным наблюдениям

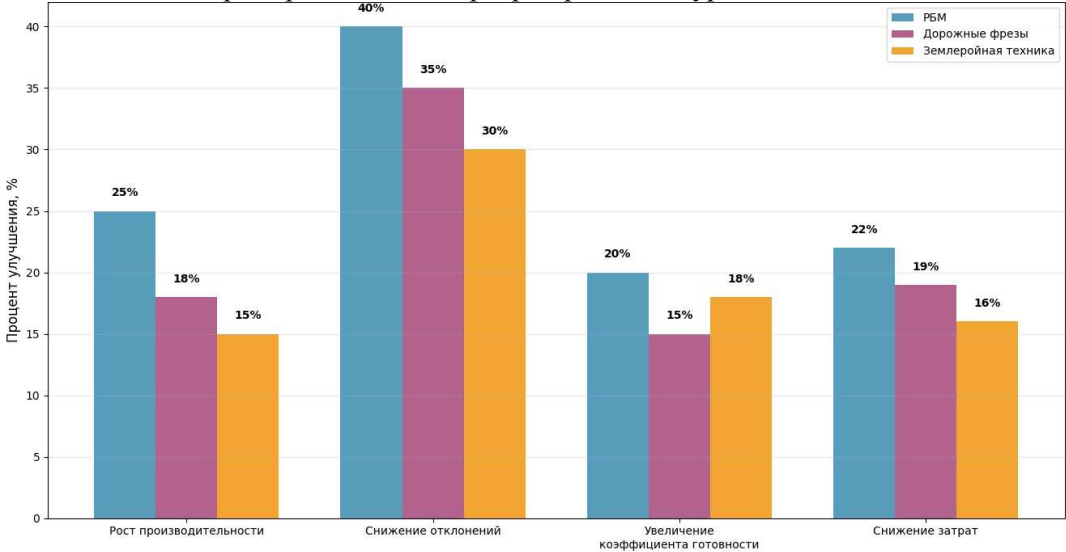


Рис. 3. Сравнительный анализ эффективности внедрения СОРВ

Из рисунка 3 следует, что наибольший эффект от применения СОРВ достигнут для роботизированных бетоноукладочных машин – рост производительности составил 25%, снижение отклонений от плановых показателей достигло 40%. Для дорожных фрез и землеройной техники показатели улучшения находятся в диапазоне 15-35%, что подтверждает универсальность предложенной методики. Особенно значимым является снижение эксплуатационных затрат на 16-22% по всем категориям оборудования, что обусловлено оптимизацией режимов работы и сокращением непродуктивных простоев.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой адаптивности системы к специфическим особенностям различных типов НТТМ, в частности, система демонстрирует высокую способность к адаптации при изменении внешних условий: автоматическая коррекция параметров при изменении свойств материалов; оперативное перераспределение ресурсов при изменении производственной программы; прогнозирование и предотвращение аварийных ситуаций.

Заключение

1. Разработанная комплексная система оценки резерва выполнения работ представляет собой универсальный методологический аппарат для цифровизации процессов управления производительностью наземных транспортно-технологических машин различного функционального назначения, основанный на единой математической модели, которая через интегральный показатель – меру резерва $R(t)$ – количественно оценивает текущие возможности техники с учетом динамически изменяющихся технических параметров, эксплуатационных условий и организационных факторов, обеспечивая переход от пассивного мониторинга к активному адаптивному управлению.

2. Внедрение СОРВ на различных типах машин (роботизированные бетоноукладочные комплексы, дорожные фрезы, землеройная техника) показало её высокую практическую эффективность и масштабируемость, позволив в среднем повысить фактическую производительность на 15-25%, сократить отклонения от плановых показателей на 30-40% и увеличить коэффициент готовности оборудования на 15-20%, что достигается за счет непрерывной оценки потенциала системы $F(t)$, адаптивной коррекции параметра штрафа $\gamma(t)$ за отклонения от плана и реализации алгоритмов ситуационного управления, выбирающих оптимальное воздействие $U^*(t)$ для максимизации ожидаемого резерва на следующем шаге.

3. Перспективным направлением развития системы является её интеграция с платформами промышленного интернета вещей для создания цифровых двойников парков машин, внедрение мультиагентных алгоритмов для координированного управления разнородной техникой в рамках единого проекта, а также использование методов машинного обучения с подкреплением для полностью автономного принятия решений, что в совокупности создаст основу для интеллектуальных строительных площадок в рамках концепции «Индустрии 4.0» и обеспечит качественно новый уровень эффективности капитального строительства и инфраструктурного развития.

Список литературы

1. Грушецкий С.М. Научные основы обеспечения эффективности производственной эксплуатации наземных транспортно-технологических машин: Дисс. ... докт. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2023. – 395 с.
2. Васильев Я.В., Гусева А.В. Общие методические аспекты применения машинного обучения при моделировании рабочих процессов роботизированных бетоноукладочных машин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – №29. – С. 30-37. – doi.org/10.26160/2658-3305-2024-29-30-37.
3. Грушецкий С.М., Васильев Я.В., Дедков И.Г., Гусева А.В. Методические основы комплексной оценки резерва выполнения работ при управлении производительностью НТТМ // Грузовик. – 2025. – №11. – С. 50-53. – doi.org/10.36652/1684-1298-2025-11-50-53.
4. Sivilevicius H., Martišius M. The Significance of the Factors Increasing the Asphalt Pavement Recycling Rate in the Country, Determined Using Multiple-Criteria Decision-Making Methods // Applied Sciences. 2023, vol. 13(22), p. 12226. doi.org/10.3390/app132212226.
5. Попов С.Н., Антонюк Д.А. Анализ характера износа и определение критериев работоспособности рабочих органов дорожных фрез // Проблемы трибологии. – 2007. – №1. – С. 3-12.

6. Игнатов С.Д., Шерстнев Н.С. Анализ математической модели рабочего процесса дорожной фрезы при разрушении асфальтобетона // Вестник СибАДИ. – 2017. – №3(55). – С. 120-124.
7. Petrescu M.G., Dumitru T., Laudacescu E., Tănase M. Experimental Investigation and Numerical Analysis Regarding the Influence of Cutting Parameters on the Asphalt Milling Process // Materials. 2024, vol. 17(14), p. 3475. doi.org/10.3390/ma17143475.
8. Dumitru T., Petrescu M.G., Tănase M., Ilinca C.N. Multi-Response Optimization Analysis of the Milling Process of Asphalt Layer Based on the Numerical Evaluation of Cutting Regime Parameters // Processes. 2023, no. 11, p. 2401. doi.org/10.3390/pr11082401.
9. New Study Shows AI Can Predict Asphalt Wear and Tear in Roads. Dhull Nidhi. AZoBuild. 09 November 2025 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.azobuild.com/news.aspx?newsID=23723>.
10. Fahad M., Bektas N. Data-Driven Pavement Performance: Machine Learning-Based Predictive Models // Applied Sciences. 2025, vol. 15(7), p. 3889. doi.org/10.3390/app15073889.

References

1. Grushetskii S.M. Scientific foundations for ensuring the efficiency of production operation of ground transport and technological machines: Diss. ... doct. of tech. sc. – Saint-Petersburg, 2023. – 395 p.
2. Vasiliev Ya.V., Guseva A.V. General methodological aspects of the application of machine learning in modeling the working processes of robotic concrete paving machines // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2024, no. 29, pp. 30-37. doi.org/10.26160/2658-3305-2024-29-30-37.
3. Grushetskii S.M., Vasiliev Ya.V., Dedkov I.G., Guseva A.V. Methodological foundations for a comprehensive assessment of the work performance reserve when managing the productivity of ground transport and technological machines // Truck. 2025, no. 11, pp. 50-53. doi.org/10.36652/1684-1298-2025-11-50-53.
4. Sivilevicius H., Martišius M. The Significance of the Factors Increasing the Asphalt Pavement Recycling Rate in the Country, Determined Using Multiple-Criteria Decision-Making Methods // Applied Sciences. 2023, vol. 13(22), p. 12226. doi.org/10.3390/app132212226.
5. Popov S.N., Antoniuk D.A. Analysis of the nature of wear and determination of performance criteria for road milling machine working bodies // Problems of tribology. 2007, no. 1, pp. 3-12.
6. Ignatov S.D., Sherstnev N.S. Analysis of the mathematical model of the road milling machine working process during asphalt concrete destruction // Bulletin of SibADI. 2017, no. 3(55), pp. 120-124.
7. Petrescu M.G., Dumitru T., Laudacescu E., Tănase M. Experimental Investigation and Numerical Analysis Regarding the Influence of Cutting Parameters on the Asphalt Milling Process // Materials. 2024, vol. 17(14), p. 3475. doi.org/10.3390/ma17143475.
8. Dumitru T., Petrescu M.G., Tănase M., Ilinca C.N. Multi-Response Optimization Analysis of the Milling Process of Asphalt Layer Based on the Numerical Evaluation of Cutting Regime Parameters // Processes. 2023, no. 11, p. 2401. doi.org/10.3390/pr11082401.
9. New Study Shows AI Can Predict Asphalt Wear and Tear in Roads. Dhull Nidhi. AZoBuild. 09 November 2025 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.azobuild.com/news.aspx?newsID=23723>.
10. Fahad M., Bektas N. Data-Driven Pavement Performance: Machine Learning-Based Predictive Models // Applied Sciences. 2025, vol. 15(7), p. 3889. doi.org/10.3390/app15073889.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Грушецкий Станислав Михайлович – доктор технических наук, профессор	Grushetsky Stanislav Mikhailovich – doctor of technical sciences, professor
Васильев Ярослав Владимирович – кандидат технических наук, доцент	Vasiliev Yaroslav Vladimirovich – candidate of technical sciences, associate professor
Дедков Иван Геннадьевич – аспирант	Dedkov Ivan Gennadievich – postgraduate student
Гусева Анастасия Валерьевна – аспирант	Guseva Anastasia Valeryevna – postgraduate student
Андроненков Павел Русланович – аспирант	Andronenkov Pavel Ruslanovich – postgraduate student
xen2k@rambler.ru	

Получена 03.12.2025