УДК 656.13:658.28
2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы



П.И. Смирнов
Вологодский государственный университет

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ ФРОНТАЛЬНЫХ ПОГРУЗЧИКОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ

В статье рассматривается проблема оптимизации сроков службы и затрат на содержание парка фронтальных погрузчиков, являющихся ключевым оборудованием для коммунального хозяйства, логистики и сельскохозяйственных предприятий Вологодской области. Ключевым результатом является формализация алгоритма адаптивного планирования замены, позволяющего перейти от жестких нормативов к динамическому управлению ресурсом каждого агрегата. Практическая значимость работы заключается в предоставлении инструмента для обоснования инвестиций в обновление техники и снижения эксплуатационных расходов для предприятий региона.

Фронтальный погрузчик, жизненный цикл, совокупная стоимость владения (ТСО), телематика, адаптивное управление, эксплуатационные риски, Вологодская область.

Фронтальные погрузчики представляют собой универсальную и высоко востребованную технику в структуре основных фондов многих предприятий Вологодской области. Их эксплуатация связана с значительными капитальными вложениями и высокими переменными затратами на топливо, обслуживание и ремонт. Традиционный подход к управлению парком, основанный на фиксированных нормативах межремонтных ресурсов и сроков службы, не учитывает индивидуальную историю нагружения каждой единицы, что ведет к преждевременным списаниям или, напротив, к эксплуатации изношенной техники с зашкаливающими затратами на поддержание ее в работоспособном состоянии [3].

В научной литературе вопросы оптимизации жизненного цикла строительной и специальной техники рассматриваются как в рамках классических моделей надежности и стоимости владения [4], так и с применением современных методов анализа данных [10]. Исследования показывают, что использование телематики позволяет значительно повысить точность прогнозирования остаточного ресурса [7, 10]. Однако существующие разработки часто носят общий характер или ориентированы на карьерную технику, не учитывая специфику работы фронтальных погрузчиков в условиях сезонности работ (зимняя уборка снега, летние сельхозработы), характерных для Северо-Запада России, а также граничные режимы их применения [2].

Целью настоящего исследования является адаптация методологии динамического управления жизненным циклом для парка фронтальных погрузчиков с учетом региональных эксплуатационных условий. Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Синтез адаптивной экономико-технической модели, связывающей совокупную стоимость владения (ТСО) с риском роста эксплуатационных затрат.
2. Верификация модели на агрегированных данных, репрезентативных для режимов работы погрузчиков в Вологодской области.
3. Количественная оценка экономических последствий отклонения от оптимальной стратегии замены.
4. Разработка практических рекомендаций для предприятий по внедрению алгоритма адаптивного планирования.

Научная новизна заключается в разработке итеративного алгоритма перекалибровки пороговых параметров модели ТСО на основе поступающих данных телематики, что обеспечивает переход от нормативного к предиктивно-прескриптивному управлению ресурсом конкретного актива.

Экономико-техническая модель (TCO-Risk)

В основе методики лежит модель минимизации удельной совокупной стоимости владения (Total Cost of Ownership, TCO) за расчетный период. В отличие от статических моделей, ключевые параметры износа и сопутствующих рисков являются адаптивными.

Базовое уравнение для расчета средней удельной стоимости $C_{avg}(T)$ за N лет (или тысяч моточасов) (1):

$$C_{avg}(T) = \frac{1}{T}\left(C_{acq} + \sum_{t=1}^{T}\left(C_{maint}(t) + C_{fuel}(t) + C_{lub}(t) + \right.\right. \\ \left.\left. + C_{tires}(t) + C_{crew}(t) + E[\mathrm{OFC}(t)]\right)\right), \quad (1)$$

где C_{cap} – капитальные затраты (приобретение), C_{fuel}, C_{lub}, C_{maint} – операционные затраты на топливо, ГСМ и ТО и Р в i-й период, E [Risk(i)] – математическое ожидание стоимости рисков простоя и внеплановых ремонтов, $H(N)$ – совокупная наработка (м/ч).

Ожидание риска E [Risk(i)] определяется как произведение вероятности отказа на стоимость его последствий (2):

$$E\left[Risk(i)\right] = P_{fail}(i) \cdot C_{fail}\ , \qquad (2)$$

где C_{fail} – средняя стоимость последствий критического отказа, а $P_{\text{fail}}(i)$ – вероятность отказа, описываемая сигмоидальной функцией, параметры которой (точка перегиба t_0, крутизна k) калибруются под конкретные условия [4] (3):

$$P_{\text{fail}}(t) = P_{\max} \cdot \frac{1}{1+e^{-k(t-t_0)}}\,. \qquad (3)$$

Оптимальный срок замены N^* формализуется как аргумент минимума функции средней стоимости (4):

$$N^* = \arg\min_{T\in\{1,2,\ldots,T_{\max}\}} C_{\text{avg}}(T)\,. \qquad (4)$$

Источники данных и параметризация

Для первичной калибровки модели использованы агрегированные и обезличенные данные по эксплуатации фронтальных погрузчиков мощностью 100–150 л.с., характерных для предприятий региона [8]. Сформирована типовая структура затрат на основе экспертных оценок, данных отраслевых справочников [5] и анализа открытой отчетности сервисных компаний. За основу взят режим работы с высокой сезонной нагрузкой (до 2000 м/ч в год). Для учета влияния износа на эксплуатационные показатели, таких как рост удельного расхода топлива, может использоваться регрессионная зависимость (5):

$$q_{fuel}(H) = \beta_0 + \beta_1 H + \beta_2 H^2\ , \qquad (5)$$

где $q_{\text{fuel}}(H)$ – удельный расход топлива при наработке H.

Алгоритм адаптивной перекалибровки

Ядро системы – алгоритм, который активируется при фиксации устойчивого отклонения ключевых операционных метрик (например, среднего расхода топлива на м/ч или частоты мелких отказов) от базовых значений, заложенных в модель. Порог отклонения в 15–20 % выбран эмпирически как точка, после которой несоответствие модели реальности начинает приводить к существенным экономическим погрешностям в прогнозах. При его превышении запускается статистическая проверка значимости тренда (например, критерий Манна – Уитни), и в случае подтверждения производится переоценка параметров модели (k, t_0, C_{fail}) по расширенной выборке данных. Такой подход к корректировке нормативов в соответствии с условиями эксплуатации является современным трендом [1, 3].

Верификация модели и определение оптимального интервала

Анализ по типовым данным показал, что кривая удельных затрат C_{avg} имеет выраженный минимум. Для универсального фронтального погрузчика в условиях региона оптимальный экономический срок замены составил 5–6 лет при достижении наработки 8–10 тысяч моточасов.

К этому моменту структура затрат претерпевает значительные изменения (табл. 1): после 5-го года эксплуатации доля затрат на ремонты и риски простоя в структуре ТСО возрастает с 20–25 % до 50–60 %, что подтверждает необходимость смещения фокуса управления с контроля топливной эффективности [6] на управление надежностью.

Таблица 1

Структура типовых эксплуатационных затрат фронтального погрузчика (мощность 100–150 л.с.)

Статья затрат	Доля в годовых затратах на 1-м году, %	Доля в годовых затратах на 5-м году, %	Примечание (характерное для Вологодской обл.)
Амортизация (капитальные затраты)	30–35	20–25	Зависит от схемы финансирования (лизинг/покупка)
Затраты на топливо и ГСМ	35–40	40–45	Повышена из-за низких температур и работы на пониженных передачах [6]
Затраты на ТО и текущий ремонт	15–20	25–30	Рост связан с увеличением частоты отказов $P_{\text{fail}}(i)$
Затраты на шины	8–12	5–10	Сильно зависит от типа покрытия (грунт/асфальт)
Операционный риск (простои)	2–5	5–10	Формализуется в модели через E[Risk(i)]

Таблица 2

Результаты анализа чувствительности модели TCO-Risk для фронтального погрузчика

Сценарий эксплуатации	Оптимальный срок замены (N^*), лет	Оптимальная наработка (H^*), тыс. м/ч	Рост C_{avg} при замене на 3-м году	Рост C_{avg} при эксплуатации до 8 лет
Умеренная (склад/логистика)	*6*	*9,0–10,5*	*+15 – 20 %*	*+25 – 35 %*
Высокая (коммунальное х-во, зимние работы)	5	7,5–9,0	+20 – 25 %	+35 – 45 %
Агрессивная (стройплощадка, грунты)	4–5	6,0–8,0	+25 – 30 %	+40 – 55 %

Таблица 3

Вклад факторов износа в рост эксплуатационных затрат (на примере погрузчика в сценарии «Высокая нагрузка»)

Фактор влияния	Относительный вклад в прирост C_{avg} после 5-го года, %	Контролируемый параметр (телематика)
Износ силового агрегата (падение КПД, рост расхода)	30–40	Удельный расход топлива q_{fuel} (л/м·ч), температура ОЖ
Износ гидросистемы (падение давления, утечки)	25–35	Время рабочего цикла, температура гидромасла
Износ ходовой/трансмиссии	20–30	Уровень вибраций, параметры пробуксовки
Общий рост вероятности отказов (P_{fail})	10–15	Наработка на отказ, количество кодов неисправностей

Чувствительность к отклонениям и региональные факторы

Имитационное моделирование на основе уравнений (1)–(4) показало высокую чувствительность совокупной стоимости владения к сроку замены. Результаты для различных сценариев эксплуатации представлены в таблице 2.

Преждевременная замена ведет к существенным потерям из-за неамортизированной стоимости актива, в то время как запоздалая вызывает лавинообразный рост расходов на ремонты и простои вследствие увеличения $P_{fail}(i)$. Ключевым региональным фактором, усиливающим износ и смещающим точку перегиба t_0 на более ранние сроки, является сезонная эксплуатация в тяжелых условиях (работа с абразивными материалами зимой, повышенная влажность).

Вклад факторов износа и практическая интерпретация

Многофакторный анализ позволил оценить относительный вклад различных компонентов в рост эксплуатационных затрат после прохождения оптимального срока службы (табл. 3).

Разработанный подход позволяет предприятиям региона:

1. Отказаться от единого норматива для всего парка. Погрузчик, работающий на зернотоке, и погрузчик на полигоне ТКО будут иметь разные прогнозные кривые износа и, следовательно, разные N^*.

2. Обосновывать инвестиции в обновление не по календарному графику, а по фактическому состоянию, определяемому через мониторинг параметров из таблицы 3.

3. Планировать бюджет на ремонты и создание резерва на замену на основе предиктивной, а не реактивной модели. Интеграция такого подхода в общую систему цифровизации рабочих процессов позволяет существенно повысить экономическую эффективность [7].

Проведенное исследование подтвердило высокую практическую применимость методологии адаптивного управления жизненным циклом на основе модели TCO-Risk для оптимизации использования парка фронтальных погрузчиков в условиях Вологодской области.

Основной *практический вывод* заключается в том, что для предприятий региона экономически целесообразно ориентироваться на плановую замену универсальных фронтальных погрузчиков на рубеже 5–6 лет эксплуатации (8–10 тыс. м/ч). Однако ключевое значение имеет не следование этому усредненному нормативу, а его верификация через мониторинг ключевых эксплуатационных показателей (удельный расход топлива, параметры гидросистемы, частота отказов) с использованием систем телематики. Внедрение предложенного алгоритма адаптивной перекалибровки модели позволяет перейти от управления по предписанию к управлению по состоянию, минимизируя финансовые потери от неоптимальных решений о замене.

Перспективой дальнейших исследований является углубленная параметризация модели для конкретных моделей погрузчиков и типов работ (складская логистика, сельское хозяйство, коммунальная сфера) с формированием библиотеки типовых кривых износа, а также интеграция данной методики в более широ-

кий контекст цифровизации рабочих процессов машин [7].

Литература

1. Бондаренко, А. А. Опыт и сравнительный анализ эффективности эксплуатации дизельных и электрических погрузочно-доставочных машин / Бондаренко А. А., Шарипов Р. Х. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – № 4. – С. 246–257.

2. Журавлев, А. Г. Граничные технико-экономические показатели применимости фронтальных погрузчиков при работе в качестве выемочно-транспортных машин / А. Г. Журавлев, В. В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 5. – С. 186–195.

3. Карагодин, В. И. Корректирование нормативов технической эксплуатации дорожно-строительных машин для характерных условий их эксплуатации / В. И. Карагодин, А. Ю. Горелов, А. И. Салагубов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 20. – С. 83–89.

4. Подходы к оптимизации жизненного цикла арктической транспортной техники / М. Ю. Карелина, Р. В. Клюев, А. В. Терентьев [и др.] // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2025. – Т. 19, № 11. – С. 58–65.

5. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (2021). Методика определения сметных цен на эксплуатацию машин и механизмов : Приказ Минстроя России от 13.12.2021 № 916/пр (редакция от 06.10.2023). – Текст : электронный // Официальный сайт Минстроя России. – URL: https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/9b0/Metodika-opredeleniya-smetnykh-tsen-na-ekspluatatsiyu-mashin-i-mekhanizmov.pdf (дата обращения: 11.11.2024).

6. Раков, В. А. Анализ приспособленности трансмиссии автомобиля к топливной экономичности ДВС / Раков В. А., Трушин Н. Н. // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте : материалы XVI Международной научно-технической конференции (Вологда, 08 декабря 2021 г.). – Вологда : ВоГУ, 2022. – С. 354–358.

7. Цифровизация системы организации рабочих процессов лесозаготовительных машин: оценка эффективности на примере "Ponsse", "Komatsu" и "John Deere" / В. В. Сиваков, А. Н. Заикин, Т. П. Новикова [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 3(51). – С. 200–218.

8. Смирнов, П. И. Сравнение эффективности электрического колесного погрузчика и дизельного погрузчика / П. И. Смирнов // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2024. – № 2(24). – С. 76–81.

9. A method for economic evaluation of predictive maintenance technologies by integrating system dynamics and evolutionary game modelling / Meng H., Liu X., Xing J., Zio E. // Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Vol. 222. – Art. 108424.

10. Predictive asset availability optimization for underground trucks and loaders in the mining industry / Patil S., Mitra A., Katarikonda K., Wansink J.-D. // OPSEARCH. – 2021. – Vol. 58. – P. 225–246.

P.I. Smirnov
Vologda State University

ADAPTIVE RESOURCE MANAGEMENT OF FRONT LOADERS BASED ON OPERATIONAL DATA ANALYSIS IN VOLOGDA OBLAST

The article addresses the problem of optimizing the service life and maintenance costs of front-end loader fleets, which are key equipment for municipal services, logistics, and agricultural enterprises in the Vologda Region. The key result is the formalization of an adaptive replacement planning algorithm, enabling a shift from rigid standards to dynamic management of each unit's resource. The practical significance of the work lies in providing a tool for justifying investments in equipment renewal and reducing operating costs for regional enterprises.

Front-end loader, lifecycle, total cost of ownership (TCO), telematics, adaptive management, operational risks, Vologda Region.