УДК 629.4.083

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ «АФРОСИЁБ» (TALGO 250) НА ОСНОВЕ ПЕРЕХОДА К ОБСЛУЖИВАНИЮ ПО ФАКТИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

Рахмонов Миртемир Илхомиддин угли
Абдуганиев Аброр Алишер угли
Дусназаров Мехрожиддин Сирожиддин угли
Рахматов Хамза Абдулхакимович
Ташкентский государственный транспортный университет
https://doi.org/10.5281/zenodo.22917979

Аннотация. В статье проанализирована система технического обслуживания и ремонта (ТОиР) парка из шести электропоездов Talgo 250 («Афросиёб») по регламенту РМ-58, где цикл до капитального ремонта (4,032 млн км) включает 672 захода в депо (85,7 % — сервис IS) со сроком наступления от 7,2 до 16,4 года в зависимости от маршрута. Выявлена диспропорция спроса: на линии Ташкент – Бухара населённость превышает 100 %, тогда как на участке Ташкент – Самарканд пассажиропоток за 2021–2025 гг. сократился на 20,7 %. Доказано, что при нормативе надежности $R_{доп}$=0,97 срок упреждающего ремонта узлов составляет от 3 % ($\beta=1$) до 46 % ($\beta=4$) средней наработки, ввиду чего эффективность стратегий CBM/PdM напрямую зависит от параметра формы распределения и требует сбора статистики отказов. Оценка чувствительности инвестиций в расширение парка показала критическую зависимость от доходности: NPV обращается в нуль при снижении выручки на 12 % либо росте эксплуатационных затрат на 18 %.

Ключевые слова: высокоскоростной электропоезд; Talgo 250; «Афросиёб»; техническое обслуживание и ремонт; ремонтный цикл; обслуживание по состоянию; распределение Вейбулла; винеровский процесс; коэффициент технической готовности; анализ чувствительности.

1. Введение

Скоростное железнодорожное сообщение в Республике Узбекистан организовано на модернизированных линиях колеи 1520 мм без строительства выделенных высокоскоростных магистралей. С 2011 г. на участке Ташкент – Самарканд протяжённостью 344 км эксплуатируются электропоезда Talgo 250 под брендом «Афросиёб»; впоследствии сообщение было продлено до Карши и Бухары [2, 3]. После заказов 2015 и 2019 гг. и удлинения двух первых составов парк насчитывает шесть поездов компоновки «два силовых головных вагона + 11 пассажирских вагонов» с питанием от контактной сети однофазного переменного тока 25 кВ, 50 Гц и мощностью 4,8 МВт [2, 3]. Развитие скоростного сообщения отнесено к приоритетам Стратегии «Узбекистан – 2030» [1], а ввод в эксплуатацию электропоездов на платформе Hyundai Rotem формирует смешанный парк с принципиально различными регламентами ТО и Р.

Конструкция Talgo 250 – сочленённая схема с одноосными ходовыми экипажами, независимо вращающимися колёсами и системой наклона кузова – исключает расцепку промежуточных вагонов в депо и определяет специфические требования к ремонтной базе. Эксплуатация протекает в резко континентальном климате с диапазоном

температур от +40 до −25 °C [2] и при высокой запылённости воздуха. Влияние бортовых систем безопасности поезда на условия эксплуатации рассмотрено в [4]; вместе с тем работ, количественно анализирующих структуру регламента ТО и Р этих поездов применительно к фактической загрузке полигона, в открытой печати не выявлено.

Методологической основой управления техническим состоянием служат концепция RAMS [5] и терминология надёжности [6]. Обзоры [7, 8] систематизируют методы обслуживания по состоянию и прогнозирования остаточного ресурса (ОРР), [9] – вибродиагностику подшипников качения, [10] – применение потоковой обработки данных для CBM на железнодорожном транспорте, [11] – концепцию цифрового двойника; общие требования к мониторингу состояния установлены [12], архитектура бортовой сети передачи данных – [13]. Переход от фиксированных интервалов к CBM/PdM, однако, оправдан не всегда: его эффективность зависит от закона распределения наработки узлов, что требует количественной проверки.

2. Материалы и методы

Исходные данные. Использованы: план технического обслуживания завода-изготовителя PM-58 (ред. 1 от 15.12.2011), устанавливающий восемь уровней плановых воздействий – IS, IB, IM1–IM5 и капитальный ремонт R; данные перевозчика о числе перевезённых пассажиров и предложенных мест на маршрутах Ташкент – Самарканд и Ташкент – Бухара за 2021–2025 гг.; тарифы и тарифные расстояния на 01.02.2026; результаты финансовой модели проекта расширения парка (два маршрута, по четыре состава вместимостью 389 мест, ставки дисконтирования 6, 9 и 12 %). Основные параметры подвижного состава приведены в табл. 1. Все исходные данные проверены на внутреннюю согласованность; выявленные расхождения указаны в разделах 3 и 4.

Таблица 1 – Основные параметры эксплуатируемого и перспективного подвижного состава

Параметр	Talgo 250 («Афросиёб»)	Платформа Hyundai Rotem
Конструкционная скорость, км/ч	250	250
Система тягового электроснабжения	25 кВ, 50 Гц	25 кВ, 50 Гц
Компоновка состава	2 силовых головных + 11 пассажирских вагонов	4 моторных + 3 прицепных вагона
Тяговая мощность, кВт	4 800 (2 × 2 400)	5 120 (16 × 320)
Пассажировместимость, мест	287 (216 / 49 / 22)	389 (317 / 72)
Масса тары, т	312	369
Средняя осевая нагрузка, т	15,6	13,1
Номенклатура видов ТО и Р	IS, IB, IM1–IM5, R	ES, MI, SWT, LI, GI, FGI

Структурный анализ ремонтного цикла. Для уровня k с номинальным пробегом L_k число выполнений за цикл до капитального ремонта L_R и число постановок, в которых уровень k является старшим (с учётом вложенности работ), определяются как

$$N_k = \frac{L_R}{L_k}, \qquad N_k^{\text{иск}} = N_k - N_{k+1}, \tag{1}$$

Календарная модель. Годовой пробег состава и средний календарный интервал между воздействиями уровня k:

$$L_{г} = n_{р} \cdot l_{м}, \quad T_{k} = \frac{365 \cdot L_{k}}{L_{г}}, \tag{2}$$

где $n_р$ – число рейсов состава в год; $l_м$ – тарифная длина маршрута, км. Рассмотрены два графика: базовый – один оборот в сутки ($n_р$=730) и с удвоением частоты в $D_в$=113 выходных и праздничных дней. Коэффициент использования суточной рейсовой ёмкости состава

$$K_{исп} = \frac{(365 - D_{в}) \cdot n_{б} + D_{в} \cdot n_{в}}{365 \cdot n_{max}}, \tag{3}$$

где $n_б$ = 2, $n_в$ = 4 – число рейсов в будний и выходной день; n_{max}=4 – максимальное число рейсов в сутки. Отсюда $n_р$ = 956 рейсов в год.

Модели надёжности. На уровне совокупности однотипных узлов принята модель Вейбулла с вероятностью безотказной работы и интенсивностью отказов

$$R(t) = exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right], \quad \lambda(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}, \tag{4}$$

где β – параметр формы; η – параметр масштаба. Момент упреждающего вывода узла в ремонт по нормативу $R_{доп}$ и его отношение к средней наработке $T_{ср} = \eta\Gamma(1 + 1/\beta)$:

$$t^{*} = \eta\left(-ln\, R_{доп}\right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad \frac{t^{*}}{T_{ср}} = \frac{\left(-ln\, R_{доп}\right)^{1/\beta}}{\Gamma(1 + 1/\beta)}. \tag{5}$$

На уровне индивидуального узла, оснащённого средствами мониторинга, деградация описывается винеровским процессом со сносом $X(t) = X_0 + \mu t + \sigma B(t)$, где $B(t)$ – стандартное броуновское движение. Время первого достижения порога D имеет обратное гауссовское распределение [8]:

$$f_{T}(t) = \frac{D - X_{0}}{\sqrt{2\pi\sigma^{2}t^{3}}} exp\left[-\frac{(D - X_{0} - \mu t)^{2}}{2\sigma^{2}t}\right], \quad E[T] = \frac{D - X_{0}}{\mu}. \tag{6}$$

Готовность парка оценивается коэффициентом технической готовности [6]

$$K_{тг} = \frac{T_{э}}{T_{э} + T_{то} + T_{р}}, \tag{7}$$

где $T_э$, $T_{то}$, $T_р$ – суммарное время нахождения в работоспособном состоянии, в плановом ТО и в ремонте соответственно.

Экономическая оценка выполнена методом дисконтированных денежных потоков [14]:

$$NPV = \sum_{t=0}^{T} \frac{Д_{t} - З_{t} - К_{t}}{(1 + E)^{t}}, \tag{8}$$

где $Д_t$, $З_t$, $К_t$ – доходы, эксплуатационные и капитальные затраты года t; E – ставка дисконтирования. Чувствительность исследована однофакторным варьированием цены (объёма) услуг, эксплуатационных и инвестиционных затрат в диапазоне ±20 % с шагом 10 %; критические значения факторов (NPV = 0) определены линейной интерполяцией.

3. Результаты

3.1. Структура ремонтного цикла

Результаты расчёта по (1) приведены в табл. 2 и на рис. 1. Номинальные пробеги образуют последовательность с кратностями 7, 3 и далее 2, а допуск на отклонение пробега одинаков для всех уровней и составляет ±20 %. За цикл до капитального ремонта состав ставится в депо 672 раза; 576 постановок (85,7 %) приходятся на IS и 64 (9,5 %) – на IB, тогда как все углублённые уровни IM1–IM5 и R в сумме дают лишь 32 постановки (4,8 %).

Таблица 2 – Структура ремонтного цикла по регламенту РМ-58

Уровень	**L_{min}, тыс. км**	**L_k, тыс. км**	**L_{max}, тыс. км**	**L_k/L_{k-1}**	**N_k**	**$N_k^{иск}$**	**Доля, %**
IS	4,8	6	7,2	–	672	576	85,7
IB	33,6	42	50,4	7	96	64	9,5
IM1	100,8	126	151,2	3	32	16	2,4
IM2	201,6	252	302,4	2	16	8	1,2
IM3	403,2	504	604,8	2	8	4	0,6
IM4	806,4	1 008	1 209,6	2	4	2	0,3
IM5	1 612,8	2 016	2 419,2	2	2	1	0,15
R	3 225,6	4 032	4 838,4	2	1	1	0,15
Итого	–	–	–	–	–	**672**	**100**

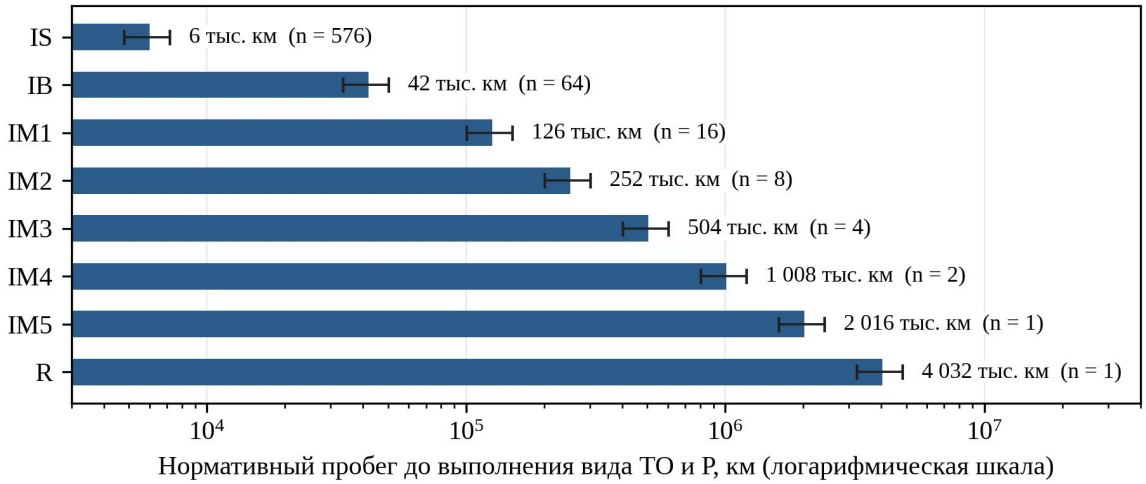

Рисунок 1 – Структура нормативных пробегов по системе РМ-58 (планки – допуск ±20 %; n – число постановок, в которых уровень является старшим)

Поскольку номинальный пробег каждого уровня кратен пробегу предыдущего, а допуски одинаковы в относительных единицах, выполнение уровня *k* совпадает с очередным выполнением уровня *k−1* (каждым 7-м IS, каждым 3-м IB, каждым 2-м IM), что позволяет без нарушения регламента совмещать работы при одной постановке. Операции с особой периодичностью также укладываются в сетку: ультразвуковой контроль осей через 250 тыс. км (после первого года с интервалом 100 тыс. км) попадает в окно IM2 (201,6–302,4 тыс. км).

3.2. Календарные интервалы ТО и Р

По (3) $K_{исп}$ = 956/1460 = 65,5 %. Календарные интервалы, рассчитанные по (2) для двух маршрутов и двух графиков, приведены в табл. 3. Сервисное обслуживание IS выполняется через 3,9–8,9 сут, а капитальный ремонт наступает через 7,2–16,4 года, т. е. в зависимости от закрепления состава за маршрутом календарный возраст до ремонта R различается в 2,3 раза.

Таблица 3 – Расчётные календарные интервалы ТО и Р при различных условиях эксплуатации

Показатель	Ташкент – Самарканд (336,3 км)		Ташкент – Бухара (584,2 км)	
	$n_р$=730	$n_р$=956	$n_р$=730	$n_р$=956
Годовой пробег $L_г$, тыс. км	245,5	321,5	426,5	558,5
Среднесуточный пробег, км	673	881	1 168	1 530
Интервал IS, сут	8,9	6,8	5,1	3,9
Интервал IB, сут	62	48	36	27
Интервал IM1, сут	187	143	108	82
Интервал IM2, сут	375	286	216	165
Интервал IM3, лет	2,1	1,6	1,2	0,9
Интервал IM5, лет	8,2	6,3	4,7	3,6
Интервал R, лет	16,4	12,5	9,5	7,2
Пробег за 30 лет, млн км	7,4	9,6	12,8	16,8

3.3. Спрос, тарифы и загрузка парка

Динамика перевозок представлена в табл. 4 и на рис. 2. На маршруте Ташкент – Самарканд после максимума 2023 г. пассажиропоток за 2021–2025 гг. сократился на 20,7 % (среднегодовой темп −5,6 %) при сокращении предложения мест лишь на 8,7 %, вследствие чего отношение *k*=пассажиры/места снизилось с 89,0 до 69,3 %. На маршруте Ташкент – Бухара пассажиропоток вырос на 12,7 % (+3,0 % в год) при сокращении предложения на 4,1 %, и с 2022 г. k превышает 100 %.

Таблица 4 – Пассажиропоток на маршрутах сообщения «Афросиёб»

Год	Ташкент – Самарканд			Ташкент – Бухара		
	пассажиры, чел.	места, ед.	k, %	пассажиры, чел.	места, ед.	k, %
2021	389 745	487 700	79,9	289 606	314 180	92,2
2022	399 148	465 813	85,7	290 250	282 361	102,8
2023	419 579	471 378	89,0	299 908	274 589	109,2
2024	338 349	461 087	73,4	314 440	294 275	106,9
2025	308 921	445 489	69,3	326 464	301 315	108,3
2025/2021	**−20,7 %**	**−8,7 %**	**−10,6 п. п.**	**+12,7 %**	**−4,1 %**	**+16,1 п. п.**

Значения k>100 % физически возможны только при повторной продаже мест на промежуточных участках маршрута; следовательно, k характеризует оборот места, но не является коэффициентом населённости в строгом смысле (отношение пассажиро-километров к место-километрам), для расчёта которого необходимы данные о дальности поездок. Тем не менее устойчивое превышение 100 % указывает на дефицит провозной способности направления Ташкент – Бухара.

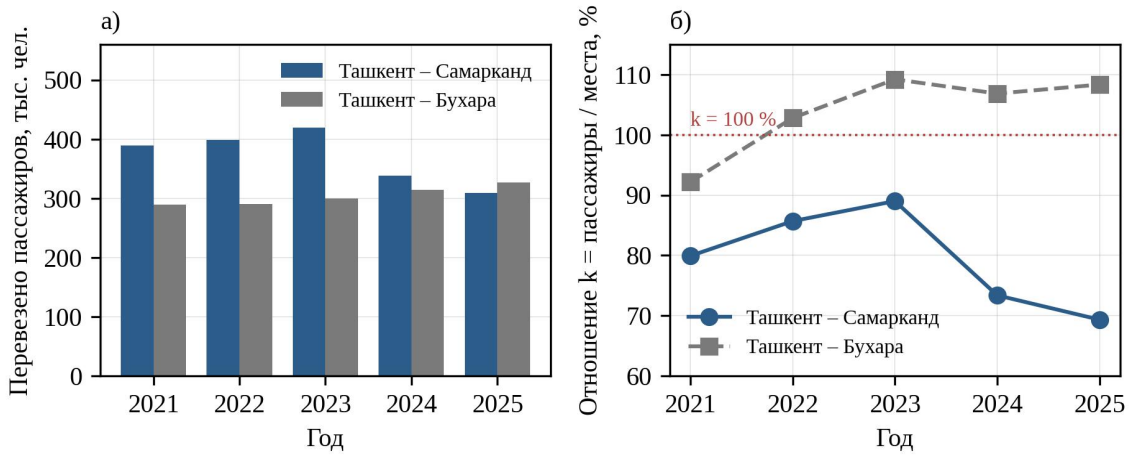

Рисунок 2 – Пассажиропоток (а) и отношение числа пассажиров к числу предложенных мест (б) в 2021–2025 гг.

Удельные тарифы (табл. 5) рассчитаны по стоимости проезда на 01.02.2026: 311, 429 и 509 тыс. сум в эконом-классе до Самарканда, Карши и Бухары соответственно. Приращение стоимости на участке Самарканд – Бухара (798,7 сум/км в эконом-классе) ниже базовой ставки, т. е. тариф на этом направлении регрессивен по дальности; на участке Самарканд – Карши приращение (929,1 сум/км) превышает базовую ставку, и регрессивность отсутствует.

Таблица 5 – Удельные тарифы, сум/пасс.-км

Направление (участок)	**Длина, км**	**Эконом**	**Бизнес**	**VIP**
Ташкент – Самарканд	336,3	924,77	1 352,96	2 108,24
Ташкент – Карши	463,3	925,97	1 385,71	2 106,63
Ташкент – Бухара	584,2	871,28	1 300,92	1 947,96
Среднее арифметическое	**–**	**907,34**	**1 346,53**	**2 054,28**
Приращение: Самарканд – Карши	127,0	929,1	1 472,4	2 102,4
Приращение: Самарканд – Бухара	247,9	798,7	1 230,3	1 730,5

Прогнозный пассажиропоток проекта расширения парка ограничен сверху значением 1 135,9 тыс. чел. в год на маршрут, что в точности равно произведению 389 мест на 2 920 рейсов (8 рейсов в сутки). Прогноз на 2026 г. (681,6 и 795,1 тыс. чел.) превышает фактический уровень 2025 г. в 2,2 и 2,4 раза; он является следствием допущения о вводе новой провозной ёмкости и заданной населённости, а не результатом эконометрической модели спроса.

3.4. Критерий вывода узла в ремонт и объекты приоритетного мониторинга

Расчёт по (5) при $R_{доп}$ = 0,97 даёт t^*/η = 0,030; 0,097; 0,175; 0,312 и 0,418 для β = 1; 1,5; 2; 3 и 4, а в долях средней наработки – $t^*/T_{ср}$ = 0,030; 0,108; 0,197; 0,350 и 0,461 (рис. 3, а). При $\beta \approx 1$ (внезапные отказы, характерные для электронных компонентов) упреждающая замена по наработке теряет смысл: узел выводился бы из эксплуатации, отработав 3 % среднего ресурса, без снижения интенсивности отказов. Для узлов с износовым и усталостным механизмом ($\beta > 1$) эффект упреждающего воздействия существенен, а при наличии измеряемого параметра деградации решение о выводе в ремонт принимается индивидуально по прогнозу (6) (рис. 3, б).

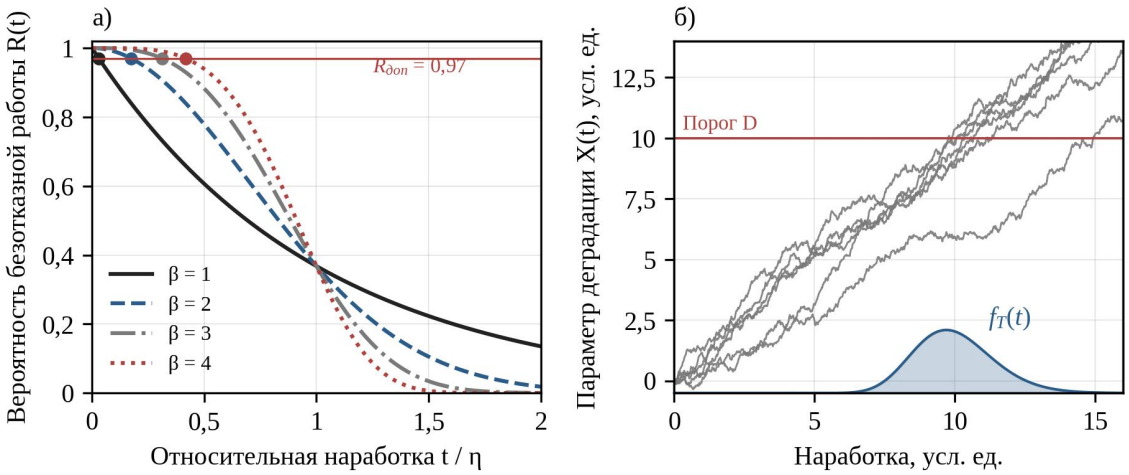

Рисунок 3 – Вероятность безотказной работы и моменты вывода в ремонт при $R_{доп}$=0,97 (а); иллюстрация винеровской деградации и плотности времени достижения порога, μ = 1, σ = 0,45, D = 10 (б)

Таблица 6 – Приоритетные объекты перехода к обслуживанию по состоянию

Объект	**Доминирующий механизм деградации; ожидаемый вид λ(t)**	**Диагностический параметр**	**Правило принятия решения**
Буксовые узлы одноосных экипажей	Контактная усталость, износ; возрастающая (β > 1)	Спектр огибающей виброускорения [9]; температура	Прогноз ОРР по (6); превышение температурного порога – немедленный вывод
Колёса (профиль катания)	Износ, прокат; квазидетерминированная деградация	Прокат, толщина гребня, эквивалентная конусность	Экстраполяция тренда до предельного значения; обточка без выкатки
Оси колёсных пар	Усталостное трещинообразование; возрастающая	Ультразвуковой контроль	Изъятие при обнаружении дефекта; интервал – по кинетике роста трещины
Гидропневматика подвешивания и наклона	Старение уплотнений, утечки; возрастающая	Давление, время подкачки, утечки	Выход тренда за границу допуска
Тяговые преобразователи (IGBT)	Термоциклическая усталость и внезапные отказы; близкая к постоянной	Температуры, токи, журнал событий бортовой системы	Мониторинг и резервирование; замена по наработке неэффективна
Токоприёмник	Износ контактных вставок; возрастающая	Контактное нажатие, износ вставок	Экстраполяция износа до предельного значения

С учётом конструкции Talgo 250 и перечня диагностических операций регламента сформирован перечень приоритетных объектов мониторинга (табл. 6). Характер

интенсивности отказов в табл. 6 указан как рабочая гипотеза, подлежащая проверке по эксплуатационной статистике.

3.5. Устойчивость экономики расширения парка

Интегральные показатели проекта расширения парка приведены в табл. 7, результаты анализа чувствительности при E=9 % – на рис. 4. В базовом сценарии NPV=50,05 млн евро, IRR=10,56 %, простой срок окупаемости 11,8 года. Интерполяция даёт критические значения факторов: снижение цены (объёма) услуг на 12,0 %, рост эксплуатационных затрат на 18,4 % и рост инвестиций на 22,6 % (последнее – экстраполяцией за пределы исследованного диапазона). Значения для варианта «инвестиции −10 %» исключены из анализа как немонотонные (NPV при −10 % превышает NPV при −20 %), что указывает на ошибку в исходных расчётах.

Таблица 7 – Интегральные показатели проекта при различных ставках дисконтирования

Показатель	**E = 6 %**	**E = 9 %**	**E = 12 %**
NPV, млн евро	199,34	50,05	−35,71
Дисконтированный срок окупаемости, лет	16,9	23,7	> 30
Индекс доходности PI (без дисконтирования)	5,47	5,47	5,47
Дисконтированный индекс доходности DPI	1,86	1,22	0,85

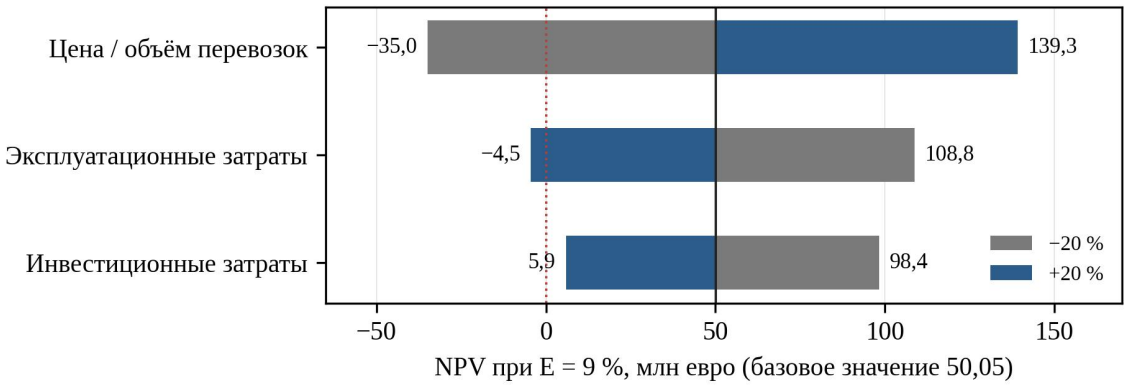

Рисунок 4 – Чувствительность NPV к изменению факторов на ±20 % (E = 9 %)

4. Обсуждение

Структура цикла. Поскольку 95,2 % постановок приходится на IS и IB, основным резервом повышения $K_{тг}$ по (7) является сокращение продолжительности и числа именно этих воздействий, а не редких углублённых ремонтов. Частичное замещение визуального контроля при IS непрерывным бортовым мониторингом [10, 13] с последующим увеличением интервала IS представляется наиболее результативной мерой, однако такое изменение затрагивает функциональную безопасность и допустимо только при доказательстве сохранения уровня риска по процедурам [5].

Календарная неоднородность. Различие календарного возраста до капитального ремонта в 2,3 раза (табл. 3) создаёт неравномерную загрузку ремонтной базы. Ротация составов между маршрутами выравнивает пробеги и упрощает планирование. За 30 лет службы состав пробегает 7,4–16,8 млн км, т. е. при назначенном ресурсе 20 млн км лимитирующим является календарный срок, а число капитальных ремонтов за срок службы составит от одного до четырёх.

Условие эффективности CBM/PdM. Результат подраздела 3.4 показывает, что вывод об экономической целесообразности перехода к обслуживанию по состоянию нельзя сделать без оценки β и η по эксплуатационным данным. В исходных материалах статистика отказов отсутствует, поэтому первым этапом перехода должен стать сбор данных о наработках и отказах в терминах [6] с последующей оценкой параметров методом максимального правдоподобия с учётом цензурирования. Модели (4) и (6) не противоречат, а дополняют друг друга: первая описывает совокупность узлов и служит для планирования оборотного фонда, вторая – индивидуальный узел и служит для принятия решения о конкретной постановке [7, 8].

Ограничение экономической части. Показатели табл. 7 и рис. 4 относятся к проекту расширения парка, а не к мероприятиям по совершенствованию ТО и Р; они характеризуют спрос и финансовые условия, под которые должна масштабироваться система обслуживания, но не доказывают окупаемость CBM/PdM. Для такой оценки необходима разностная модель затрат жизненного цикла

$$\Delta NPV = \sum_{t=0}^{T} \frac{\Delta З_{ТО,t} + \Delta З_{отк,t} + \Delta Д_t - К_{CBM,t}}{(1+E)^t}, \quad (9)$$

где $\Delta З_{ТО,t}$ и $\Delta З_{отк,t}$ – изменение затрат на плановое ТО и на устранение отказов; $\Delta Д_t$ – дополнительный доход от роста $К_{тг}$; $К_{CBM,t}$ – затраты на внедрение мониторинга. Вместе с тем рис. 4 косвенно подтверждает значимость затрат на обслуживание: рост эксплуатационных затрат на 18 % обнуляет *NPV* проекта. Критический порог снижения выручки (около 12 %) лежит внутри шага табличного варьирования и поэтому не выявляется простым просмотром табл. 7 и данных чувствительности; его следует учитывать при тарифной политике, особенно на маршруте Ташкент – Самарканд с падающим спросом.

Смешанный парк и инфраструктура. Ввод поездов Hyundai Rotem с иной номенклатурой ТО (ES – через 5 тыс. км, FGI – через 1,2 млн км) и нормальными тележками требует от депо одновременной поддержки двух регламентов и двух технологий подъёма. Целесообразна единая платформа сбора диагностических данных для обоих типов на основе [12, 13]. Рост интенсивности движения должен сопровождаться проверкой системы тягового электроснабжения по минимальному напряжению в контактной сети 19 кВ [15].

Ограничения исследования: отсутствие данных об отказах и продолжительности простоев в ТО, что не позволило количественно оценить $К_{тг}$; использование исходных данных перевозчика и проектной документации без возможности независимой проверки; допущение о закреплении состава за одним маршрутом; иллюстративный характер параметров на рис. 3, б.

5. Заключение

1. Ремонтный цикл Talgo 250 по регламенту РМ-58 до капитального ремонта (4,032 млн км) включает 672 постановки в депо, из которых 95,2 % приходятся на уровни IS и IB; кратности номинальных пробегов (7, 3, 2) и единый допуск ±20 % позволяют совмещать работы смежных уровней без нарушения регламента.

2. При фактических графиках обращения интервал IS составляет 3,9–8,9 сут, а капитальный ремонт наступает через 7,2–16,4 года; за 30-летний срок службы пробег составит 7,4–16,8 млн км, поэтому лимитирующим является календарный срок, а ротация составов между маршрутами целесообразна для выравнивания загрузки ремонтной базы.

3. Спрос на маршрутах разнонаправлен: на направлении Ташкент – Самарканд пассажиропоток за 2021–2025 гг. снизился на 20,7 %, на направлении Ташкент – Бухара вырос на 12,7 % при отношении пассажиров к местам 102,8–109,2 %, что указывает на дефицит провозной способности именно этого направления.

4. Эффективность упреждающих воздействий определяется параметром формы β: при $R_{доп}$ = 0,97 момент вывода в ремонт составляет от 3 до 46 % средней наработки. Переход к CBM/PdM целесообразно начинать с буксовых узлов и профиля катания колёс; для силовой электроники предпочтительны мониторинг и резервирование. Необходимым условием является организация сбора статистики отказов.

5. Экономика расширения парка наиболее чувствительна к доходным факторам (критическое снижение около 12 %) и к эксплуатационным затратам (критический рост около 18 %); оценка собственно мероприятий CBM/PdM требует построения разностной модели затрат жизненного цикла (9), что составляет направление дальнейших исследований.

Список литературы

1. О Стратегии «Узбекистан – 2030»: Указ Президента Республики Узбекистан от 11 сентября 2023 г. № УП-158 // Национальная база данных законодательства Республики Узбекистан.
2. Uzbekistan acquires two additional Talgo 250 trains for its high-speed fleet // Talgo: [site]. – 2019. – URL: https://www.talgo.com/en/uzbekistan-acquires-two-additional-talgo-250-trains-for-its-high-speed-fleet (date of access: 17.09.2026).
3. Uzbekistan orders more Talgo 250 trainsets // Railway Gazette International. – 2019. – 3 June. – URL:https://www.railwaygazette.com/passenger/2019/06/03/uzbekistan-orders-more-talgo-250-trainsets/ (date of access: 17.09.2026).
4. Якушев А. Я., Назирхонов Т. М., Кувондиков Ж. О., Раджибаев Д. О. Влияние системы безопасности высокоскоростного электропоезда «Afrosiyob» на условия эксплуатации // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16, вып. 3. – С. 434–442.
5. EN 50126-1:2017. Railway applications — The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 1: Generic RAMS process. – Brussels: CENELEC, 2017. – 94 p.
6. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Введ. 2017–03–01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с.
7. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2006. – Vol. 20, iss. 7. – P. 1483–1510. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
8. Si X.-S., Wang W., Hu C.-H., Zhou D.-H. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches // European Journal of Operational Research. – 2011. – Vol. 213, iss. 1. – P. 1–14. – DOI: 10.1016/j.ejor.2010.11.018.
9. Randall R. B., Antoni J. Rolling element bearing diagnostics – A tutorial // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2011. – Vol. 25, iss. 2. – P. 485–520. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2010.07.017.
10. Fumeo E., Oneto L., Anguita D. Condition based maintenance in railway transportation systems based on big data streaming analysis // Procedia Computer Science. – 2015. – Vol. 53. – P. 437–446. – DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.321.
11. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital twin in industry: state-of-the-art // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15, iss. 4. – P. 2405–2415. – DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.

12. ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines. – Geneva: ISO, 2018. – 41 p.
13. IEC 61375-1:2012. Electronic railway equipment – Train communication network (TCN) – Part 1: General architecture. – Geneva: IEC, 2012. – 96 p.
14. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов: (вторая редакция) / рук. авт. кол. В. В. Коссов, В. Н. Лившиц, А. Г. Шахназаров. – М.: Экономика, 2000. – 421 с.
15. EN 50163:2004+A1:2007. Railway applications – Supply voltages of traction systems. – Brussels: CENELEC, 2007. – 27 p.