

УДК 656.212.5+681.5

Методика проектирования робототехнических комплексов для расформирования составов на сортировочной горке

В. В. Кудюкин, В. С. Кузьмин

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Россия, 109029, Москва, Нижегородская ул., 27, стр. 1

Для цитирования: Кудюкин В. В., Кузьмин В. С. Методика проектирования робототехнических комплексов для расформирования составов на сортировочной горке // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 86–104. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-86-104

Аннотация

Цель: рассмотреть вопросы проектирования робототехнических комплексов, предназначенных для расформирования составов на сортировочных горках (далее — РТК) в условиях ограничений, накладываемых на размещение соответствующей инфраструктуры вдоль пути надвига, а также наличия неравномерности длин формируемых отцепов. Показать необходимость учета в рамках выполнения проектирования характеристик и показателей качества функционирования РТК, определяемых на основе результатов имитационного моделирования при наихудших условиях. **Методы:** включают анализ научной и технической литературы, посвященной вопросам выбора конструкции, проектирования и моделирования работы РТК; имитационное моделирование для определения параметров работы мобильной платформы робототехнического комплекса. **Результаты:** разработана методика проектирования РТК, включающая в себя пять основных этапов: сбор и обработку первичных данных об объекте внедрения и предполагаемых к внедрению технических средствах; выбор вариантов реализации с учетом ограничений на размещение соответствующей инфраструктуры; выбор вариантов реализации по стоимостному критерию и их имитационное моделирование для определения максимального числа правильно сформированных подряд отцепов при наихудших условиях: максимальной скорости надвига, минимальной длине отцепа по осям автосцепок и минимальной протяженности зоны действия мобильной платформы. **Практическая значимость:** предложенная методика позволяет выбрать конфигурацию РТК, обеспечивающую заданный уровень вероятности ошибки при формировании идущих подряд в сортировочном листке отцепов минимальной длины с учетом ограничений, накладываемых местными условиями.

Ключевые слова: сортировочная станция, сортировочная горка, робототехнический комплекс, расформирование железнодорожных составов, проектирование

Введение

Концепция «Цифровая железнодорожная станция» открытого акционерного общества «Российские железные дороги» предполагает внедрение робототехнических комплексов (далее — РТК) для выполнения ряда технологических операций, предусматривающих взаимодействие с железнодорожным подвижным составом [1–3]. Такие технические средства, в частности, планируется использовать при расформировании составов на сортировочной горке [4–7].

Интеграция РТК для расформирования составов на сортировочной горке в существующую инфраструктуру представляет собой сложную техническую задачу. С одной стороны, необходимо учесть характеристики объекта

внедрения — сортировочной станции (пути надвига), а с другой — характеристики перспективного технологического процесса, например максимальную потребную скорость надвига.

Вопросу применения РТК на железнодорожной станции в рамках технологического процесса расформирования составов посвящен целый ряд исследований, в частности [8, 9]. Однако исследования, связанные с разработкой методов проектирования, создания и оптимизации таких технических средств, отсутствуют. В литературе описываются только концептуальные проекты и результаты испытаний отдельных прототипов и их функциональных узлов [10–14]. С учетом этого требуются соответствующие методические указания, формализующие процесс разработки и проектирования. Таким образом целью настоящей работы выбрано формулирование методических основ проектирования РТК для расформирования составов на сортировочной горке.

Материалы и методы

В ряде исследований, в частности в [15], указано, что при решении задач разработки и проектирования сложной технической системы часто не учитываются показатели качества или эффективности ее функционирования. Поэтому предложенные методологические основы опираются на характеристики и показатели качества функционирования РТК, установленные с учетом результатов имитационного моделирования, изложенных в [16]. К ним относятся:

- расстояние, проходимое мобильной платформой (МП) РТК при движении в одном направлении с автосцепкой, подлежащей расцепке, при наихудших условиях;
- максимальное количество подряд правильно сформированных отцепов минимальной длины по осям автосцепок;
- вероятность пропуска автосцепки, подлежащей расцепке, в установившемся режиме при наихудших условиях.

В качестве наихудших условий с учетом [16] рассматриваются:

- максимальная скорость надвига V_H^{\max} ;
- минимальная длина отцепа по осям автосцепок $L_{\text{ОТЦ}}^{\min}$, принимаемая равной одной условной единице длины, то есть 14 м (по стандартной длине полувагона);
- минимальная протяженность $L_{\text{РТК}}^{\min}$ зоны действия МП РТК, равная максимальному расстоянию $S_{\text{П}}^{\max}$, проходимому МП РТК в прямом направлении, и получаемая при нулевой начальной ординате МП РТК при V_H^{\max} .

В качестве параметров при решении задачи проектирования РТК рассматриваются:

- максимальная скорость V_{max} каретки МП, км/ч;
- ускорение a МП РТК, м/с²;
- время t_3 задержки на начало движения МП РТК после ее стоянки/остановки, с;

- максимальное число N_{\max} правильно сформированных отцепов, шт.;
- максимальная скорость V_{H}^{\max} надвига, км/ч;
- максимальная, с учетом местных условий, протяженность M зоны действия МП РТК, м;
- установленная вероятность $P_{\text{ОШ}}$ ошибки (пропуска автосцепки, подлежащей расцепке, при условии что фактическая скорость надвига является величиной постоянной и соответствует максимальной);
- минимальная длина $L_{\text{ОТЦ}}^{\min}$ отцепов по осям автосцепок, м.

Задача проектирования РТК при этом заключается в определении такой совокупности параметров $\{V_{\max}, a, t_3\}$, которая обеспечивает наибольшую возможную величину N_{\max} при заданных $\{V_{\text{H}}^{\max}, M, P_{\text{ОШ}}, L_{\text{ОТЦ}}^{\min}\}$.

Основные положения предлагаемой методики проектирования

Первый этап предлагаемой методики включает в себя выполнение проектно-изыскательских работ, направленных на получение такой информации, как:

- количество и взаимное расположение путей надвига; ширина основной площадки земляного полотна; план и профиль пути в границах путей надвига, предполагаемых к оборудованию РТК;
- планы и рабочие чертежи с указанием мест и особенностей размещения путевого оборудования в границах предполагаемой зоны размещения РТК (светофоры, путевые ящики, путевые шкафы, муфты, стрелочные приводы, их гарнитуры, опоры контактной сети и иные объекты, ограничивающие размещение инфраструктуры РТК, включая его мобильную платформу), кабельных сетей, маршрутов служебного прохода;
- параметры существующей электропитающей установки поста электрической централизации или иного источника электрического питания оборудования на сортировочной горке;
- сведения о существующих средствах организации информационного взаимодействия с внешними модулями и системами, в частности о средствах обеспечения защищенного соединения, имеющих существенное значение для реализации подсистемы управления РТК [17] (вопросы организации информационного взаимодействия РТК в рамках проекта «Цифровая железнодорожная станция» регламентируются в документах [18, 19]);
- сортировочные листки, содержащие сведения о формируемых на горке отцепах;
- предполагаемые максимальные скорости надвига и роспуска составов с горки;
- характеристики окружающей среды, в частности погодно-климатические факторы, применяемые средства снегоборьбы и др.

Второй этап включает в себя анализ полученных исходных данных для определения ограничений, связанных с размещением инфраструктуры РТК, ее обслуживанием, ремонтом, функционированием. Должны быть определены:

- предельно допустимые по местным условиям границы зоны размещения инфраструктуры РТК;
- предельно допустимые по местным условиям границы зоны технического обслуживания оборудования РТК;
- маршруты служебного прохода к зоне технического обслуживания оборудования РТК, соответствующие ограждения и средства сигнализации;
- трассы прокладки кабельной сети для энергоснабжения и организации информационного взаимодействия РТК.

На основе анализа сортировочных листков определяется максимальное число подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок, которые могут быть сформированы с использованием РТК при максимальной скорости надвига. Определение осуществляется путем подсчета частоты возникновения последовательности из N подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок. Количество $N_{\text{сл}}$ сортировочных листков (необходимый объем выборки), достаточное для замены вероятности события ее частотой, следует определять известными методами при заданном уровне ошибки [20]. Фрагмент результатов анализа сортировочных листков на примере станции Челябинск-Главный показан в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Форма регистрации результатов анализа сортировочных листков

№ п/п	Дата выпуска ДД.ММ.ГГГГ	Идентификатор сортировочного листка (номер поезда)	Количество вагонов в составе, шт.	Количество отцепов в составе, шт.	Количество последовательностей из подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок, шт. с числом отцепов					
					2	3	4	...	9	> 9
1	2	3	4	5	6	7	8	...	13	14
1	21.01.2024	297004	82	18	2	0	0	...	0	0
2	22.01.2024	297025	64	26	4			...	0	0
...
600	26.01.2024	297736	60	34	3	1	1	...	0	1
ИТОГО					272	11	48	...	0	9
Всего последовательностей из подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок					491					

На основе результатов анализа полученной выборки заполняют табл. 2. Общее число последовательностей в анализируемых сортировочных листках для иных видов должно быть найдено как разность суммарного числа отцепов в рассмотренных составах и суммарного числа подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок.

ТАБЛИЦА 2. Форма регистрации результатов анализа числа последовательностей подряд идущих отцепов

i	Последовательность с числом отцепов K	Общее число последовательностей в анализируемых сортировочных листках N_i	Относительная частота появления последовательности с числом отцепов
1	2	272	0,079
2	3	119	0,034
3	4	48	0,014
4	5	17	0,005
5	6	26	0,008
6	7	0	0,000
7	8	0	0,000
8	9	0	0,000
9	> 9	9	0,002
10	Иная последовательность	2959	0,858
ИТОГО		3450	1,000
Всего отцепов в рассмотренных составах N			3450

На основании полученных в табл. 2 результатов строится гистограмма распределения частоты появления в сортировочном листке последовательности подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок, состоящей из K отцепов. Пример гистограммы, полученной на основе анализа сортировочных листов для станции Челябинск-Главный, показан на рис. 1. Приведенные результаты согласуются с ранее опубликованными результатами статистического анализа числа вагонов в отцепках [21].

С использованием гистограммы определяют максимальное количество отцепов минимальной длины, которое при выбранной максимальной скорости надвига сможет сформировать РТК. Для этого задается значение порога суммарной частоты появления в сортировочном листке последовательности отцепов минимальной длины, состоящей из K отцепов. Выбор порога имеет важное значение в случаях, когда имеются ограничения на размещение направляющей МП РТК и расстояние, проходимое кареткой МП РТК в прямом направлении, больше, чем расстояние, проходимое ею в обратном направлении между двумя соседними операциями по расцепке автосцепок. Порог выбирается в том числе с учетом желаемой вероятности осуществления правильного формирования всех отцепов в такой последовательности на максимальной выбранной скорости надвига.

Пусть выбранный уровень вероятности правильного (без единой ошибки) формирования всех отцепов в произвольной последовательности равен 0,99. Тогда

вероятность $P_{\text{ош}}$ ошибки при формировании всех отцепов в последовательности равна 0,01. С учетом этого на гистограмме (рис. 1) в одних осях строится кривая, соответствующая относительной частоте появления последовательности с числом отцепов K нарастающим итогом (направление оси абсцисс при этом выбрано противоположным гистограмме), а также уровень заданной вероятности ошибки при формировании всех отцепов в последовательности. Столбец, над которым пересекаются две построенные линии, соответствует выбранному для данной вероятности максимальному числу N_{max} подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок, которые могут быть сформированы при выбранной максимальной скорости надвига без ошибки (пропуска автосцепки, подлежащей расцепке) — в рассмотренном примере $N_{\text{max}} = 6$. При этом делается допущение, что величины ошибок первого и второго рода для системы технического зрения при решении ею задач позиционирования манипулятора и регистрации выполнения расцепки пренебрежимо малы.

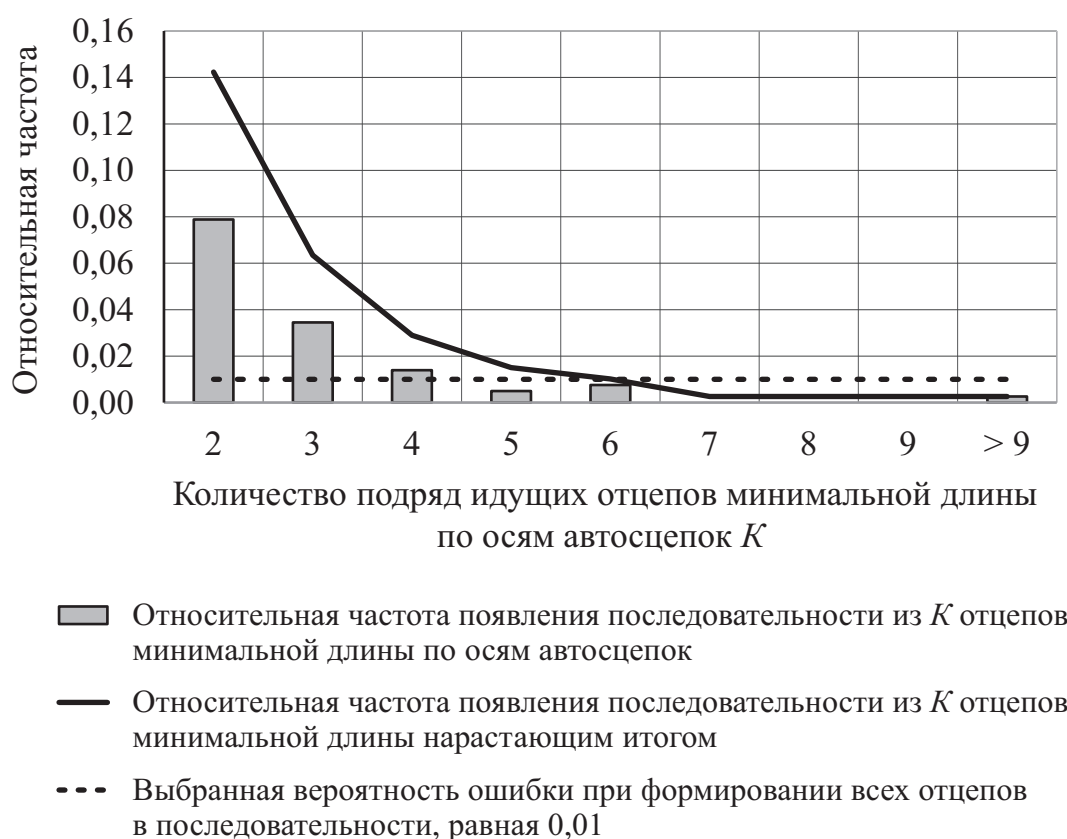


Рис. 1. Гистограмма распределения частоты появления в сортировочном листке последовательности из K отцепов минимальной длины

При необходимости использования в расчетах максимального числа подряд правильно выполненных расцепок автосцепок для последовательности отцепов минимальной длины полученное значение N_{max} следует увеличить на единицу.

Третий этап методики проектирования подразумевает выбор вариантов реализации РТК с учетом ограничений на размещение соответствующей инфраструктуры. Такой выбор осуществляется с использованием табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Форма регистрации результатов определения технико-эксплуатационных характеристик РТК

V_H^{\max} , км/ч	M , м	N_{\max} , шт.	№ п/п	V_{\max} , км/ч	a , м/с ²	t_{PH2} , с	Вар. движ. МП РТК	$S_{\text{пл}}$, м	$L_{\text{РТК}}^{\min}$, м	$S_{\text{Оmax}}$, м	N'_{\max} , шт.	$L_{\text{РТК}}^{\Phi}$, м	$\Delta S_{\text{Д}}$, м	Прим.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	100	6	1	15	3	6	от моб. дат.	26	26	49	3	2	–	Превышены границы зоны РТК
			2	15	3	6	от стац. дат.	20	20	22	6	–	1,84	–
			3	20	3	6	от моб. дат.	27	27	52	2	250	–	Превышены границы зоны РТК
			4	20	3	6	от стац. дат.	20	20	24	6	–	1,84	–

В столбце 1 указывают максимальную скорость V_H^{\max} надвига, полученную на этапах сбора и анализа исходных данных. В столбце 2 указывается максимально возможная протяженность M зоны действия МП РТК исходя из результатов анализа исходных данных. В столбце 3 указывается максимальное количество подряд идущих, правильно формируемых отцепов N_{\max} минимальной длины по осям автосцепок. В столбце 4 указывают номер по порядку варианта выполнения РТК. В столбцах 5–7 записываются значения максимальной скорости каретки МП РТК V_{\max} , ее ускорения a и общего времени выполнения операций с использованием манипулятора t_{PH2} соответственно.

При этом следует учитывать, что $V_{\max} > V_H^{\max}$, если МП РТК начинает движение по информации от возимого датчика, устанавливаемого на МП (например, системы технического зрения), и $V_{\max} \geq V_H^{\max}$, если МП РТК начинает движение по

информации от стационарного путевого датчика (например, датчика счета осей). Данные, записываемые в столбцах 5–7, могут быть взяты достаточно точно при известных типах и параметрах приводов МП, самих МП и приводов манипуляторов РТК или могут быть спрогнозированы, в случае когда такие приводы МП, сами МП или приводы манипуляторов РТК находятся в стадии разработки. Если параметры заранее неизвестны, то следует придерживаться следующей рекомендации: при прочих равных большие значения V_{\max} и a , а также меньшие t_{PH2} будут позволять увеличить фактическое количество подряд правильно выполненных отцепов N'_{\max} минимальной длины по осям автосцепок при одной и той же фактической протяженности $L_{\text{РТК}}^{\Phi}$ зоны действия МП РТК.

Вариант движения МП РТК указывают в столбце 8. В столбцах 9–10 указывают расстояние $S_{\text{Пм}}$, проходимое МП РТК в прямом направлении (в направлении движения надвигаемого состава), и минимальную протяженность $L_{\text{РТК}}^{\min}$ зоны действия МП РТК; при этом $S_{\text{Пм}} = L_{\text{РТК}}^{\min}$. Расчет $S_{\text{Пм}}$ осуществляется с использованием формулы (1):

$$S_{\text{Пм}} = V_{\max} t_{\text{PH1}} + at_{\text{P}} t_{\text{T1}} + V_{\text{H}}^{\max} (t_{\text{PH2}} + t_{\text{T2}}) + \frac{a(t_{\text{P}}^2 - t_{\text{T1}}^2 - t_{\text{T2}}^2)}{2}, \quad (1)$$

где V_{\max} — максимальная скорость МП РТК;

V_{H}^{\max} — максимальная скорость надвига;

t_{P} — время разгона МП РТК до некоторой фактической скорости $V \leq V_{\max}$;

t_{PH1} — время равномерного движения МП РТК с максимальной скоростью V_{\max} (если фактическая скорость МП РТК $V < V_{\max}$, то приравнивается к нулю);

t_{T1} — время торможения от некоторой фактической скорости V до скорости надвига V_{H}^{\max} ;

t_{PH2} — время равномерного движения МП РТК со скоростью надвига V_{H}^{\max} (равно времени выполнения технологических операций по переводу манипулятора РТК из транспортировочного положения в рабочее, позиционирования манипулятора, выполнения действий с цепью автосцепного устройства, перевод манипулятора из рабочего в транспортировочное положение; такое время определяется типом привода манипулятора и точностью его позиционирования);

t_{T2} — время торможения от V_{H}^{\max} до нуля.

Далее для каждого набора исходных данных выполняется сравнение результатов, записанных в столбцах 2 и 10. Если выполняется условие $L_{\text{РТК}}^{\min} > M$, то такие варианты далее не рассматриваются и в графе 15 приводится примечание: «Превышены границы зоны РТК», а в графах 11–14 ставятся прочерки.

Если $L_{\text{РТК}}^{\min} \leq M$, то далее в графе 11 записывают результат расчета минимального расстояния, проходимого МП РТК в обратном направлении $S_{\text{Ом}}$. Расчет $S_{\text{Ом}}$ осуществляют по формуле (2) с использованием значений временных параметров, получаемых по формулам (3), (4):

$$S_{\text{Om}} = at_{\text{PO}}^2 + V_{\text{max}}t_{\text{PHO}}, \quad (2)$$

$$t_{\text{PO}} = \begin{cases} -\frac{V_{\text{H}}^{\Phi}}{a} + \sqrt{\left(\frac{V_{\text{H}}^{\Phi}}{a}\right)^2 + P_1 Q_1}, & \text{если } \left(\frac{Q_1 - P_2}{V_{\text{max}} + V_{\text{H}}^{\Phi}}\right) = 0, \\ \frac{V_{\text{max}}}{a}, & \text{если } \left(\frac{Q_1 - P_2}{V_{\text{max}} + V_{\text{H}}^{\Phi}}\right) > 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$t_{\text{PHO}} = \frac{X_1 - P_2}{V_{\text{max}} + V_{\text{H}}^{\Phi}}, \quad (4)$$

где t_{PO} — время разгона МП РТК при движении в обратном направлении;
 t_{PHO} — время равномерного движения МП РТК в обратном направлении, с ($t_{\text{PHO}} \geq 0$);

$$P_1 = \begin{cases} \frac{1}{a}, & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} \geq X_{\text{H}}^{i+1}, \\ \frac{2}{a}, & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} < X_{\text{H}}^{i+1}; \end{cases}$$

$$P_2 = \begin{cases} \frac{V_{\text{max}}}{a} [V_{\text{max}} - 2V_{\text{H}}^{\Phi}], & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} \geq X_{\text{H}}^{i+1}, \\ \frac{V_{\text{max}}}{2a} [V_{\text{max}} + 2V_{\text{H}}^{\Phi}], & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} < X_{\text{H}}^{i+1}; \end{cases}$$

$$Q_1 = \begin{cases} L_{\text{Omin}} - V_{\text{H}}^{\Phi} \left[t_3 + \frac{V_{\text{H}}}{2a} \right], & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} \geq X_{\text{H}}^{i+1}, \\ L_{\text{Omin}} - V_{\text{H}}^{\Phi} \left[t_3 + \frac{V_{\text{H}}}{2a} + \Delta t \right], & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} < X_{\text{H}}^{i+1}; \end{cases}$$

$X_{\text{РТК}}^{i+1}$ — ордината будущей остановки мобильной платформы РТК;

X_{H}^{i+1} — ордината местонахождения автосцепки, подлежащей расцепке, в момент будущей остановки мобильной платформы;

t_3 — время задержки на начало движения МП РТК после ее стоянки/остановки (учитывает потери времени на срабатывания датчиков обнаружения автосцепки, передачу информации, в том числе управляющих сигналов, на коммутацию силовых цепей привода МП РТК и т. п.);

L_{Omin} — минимальная возможная длина отцепа (14 м).

В столбце 12 указывают фактическое количество подряд правильно выполненных отцепов N'_{max} минимальной длины по осям автосцепок при протяженности

зоны действия МРТК, равной M . Такое значение получают с использованием имитационного моделирования, поскольку формулы (1)–(4) не учитывают данный параметр, величина которого определяется местными условиями. Влияние такого ограничения на функционирование МП РТК в случае отсутствия путевого датчика показано с помощью зависимостей, приведенных на рис. 2–6 и полученных с использованием моделей, описанных в [16].

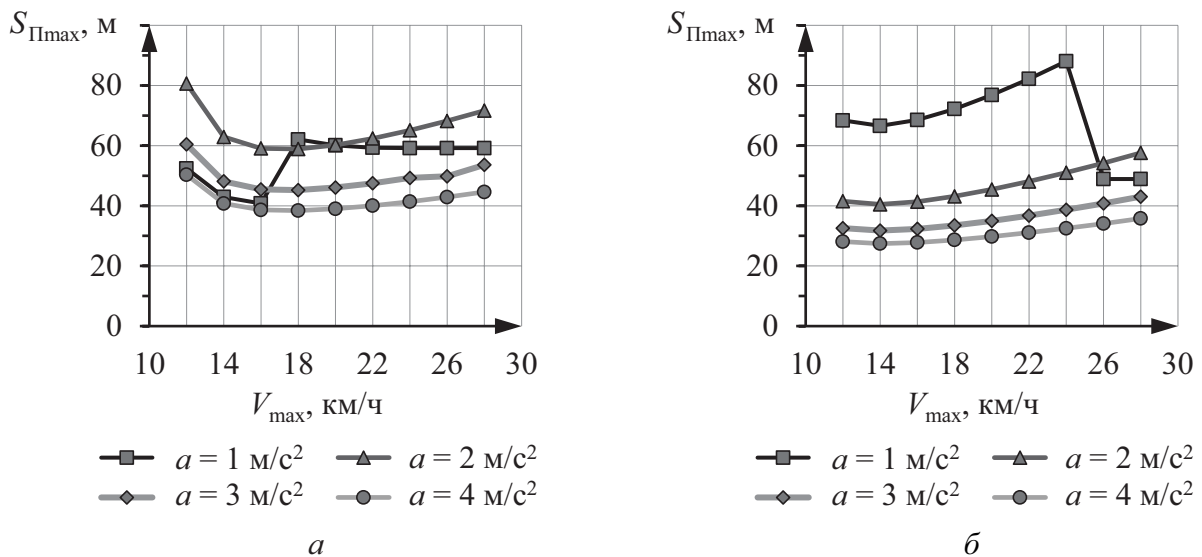


Рис. 2. Графики зависимостей максимального расстояния $S_{Пmax}$, проходимого кареткой МП РТК в направлении надвига, от максимальной ее скорости V_{max} при постоянной скорости надвига, равной: a — $V_H = 10 \text{ км/ч}$; $б$ — $V_H = 8 \text{ км/ч}$

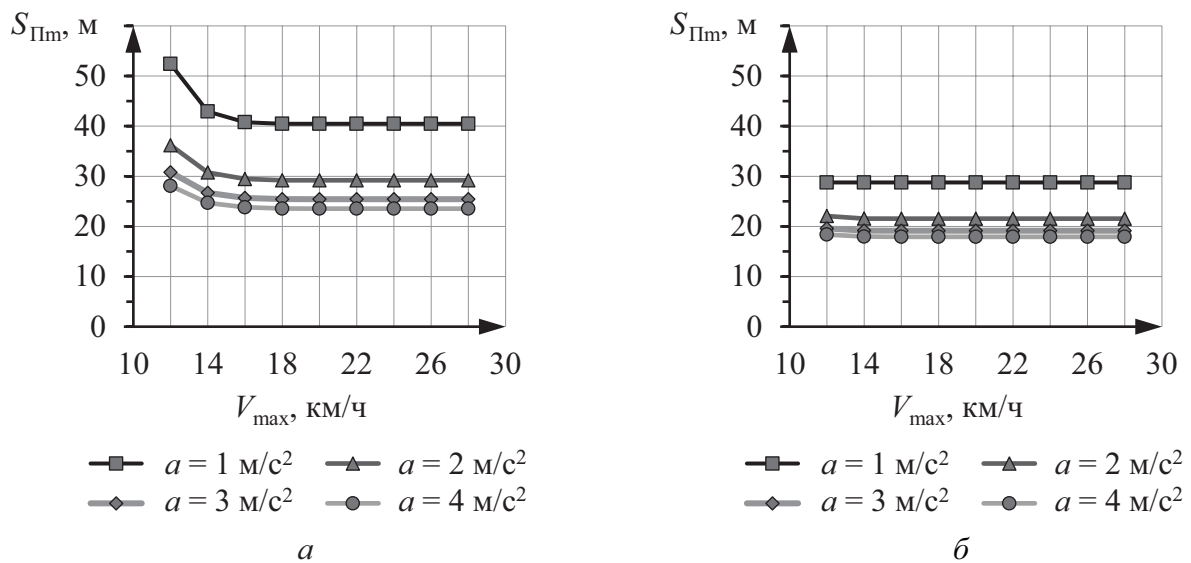


Рис. 3. Графики зависимостей минимального расстояния $S_{Пmin}$, проходимого кареткой МП РТК в направлении надвига, от максимальной ее скорости V_{max} при постоянной скорости надвига, равной: a — $V_H = 10 \text{ км/ч}$; $б$ — $V_H = 8 \text{ км/ч}$

Зависимости получены для случая, когда $t_3 = 0,2$ с, $t_{PH2} = 6$ с, $M = 100$ м. Характер полученных зависимостей объясняется необходимостью пропуска автосцепок, подлежащих расцепке, в условиях постоянной максимальной скорости надвига, из-за того, что расчетная ордината каретки МП РТК в момент окончания движения в направлении надвигаемого состава после выполнения очередной технологической операции будет находиться вне границ зоны действия МП РТК.

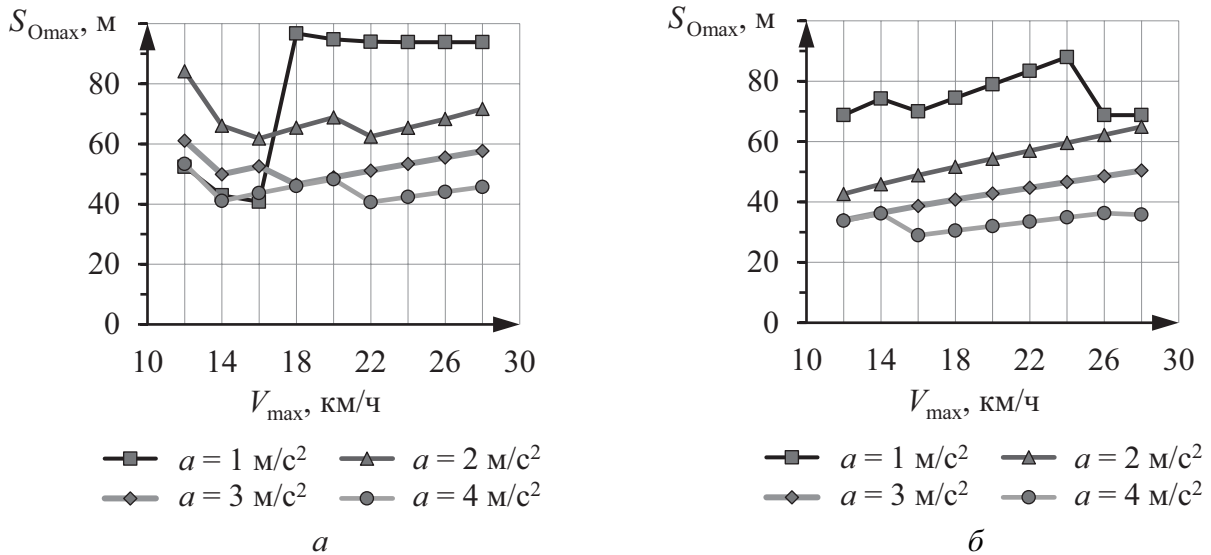


Рис. 4. Графики зависимостей максимального расстояния S_{Omax} , проходимого кареткой МП РТК в направлении, противоположном надвигу, от максимальной ее скорости V_{max} при постоянной скорости надвига, равной: а — $V_H = 10$ км/ч; б — $V_H = 8$ км/ч

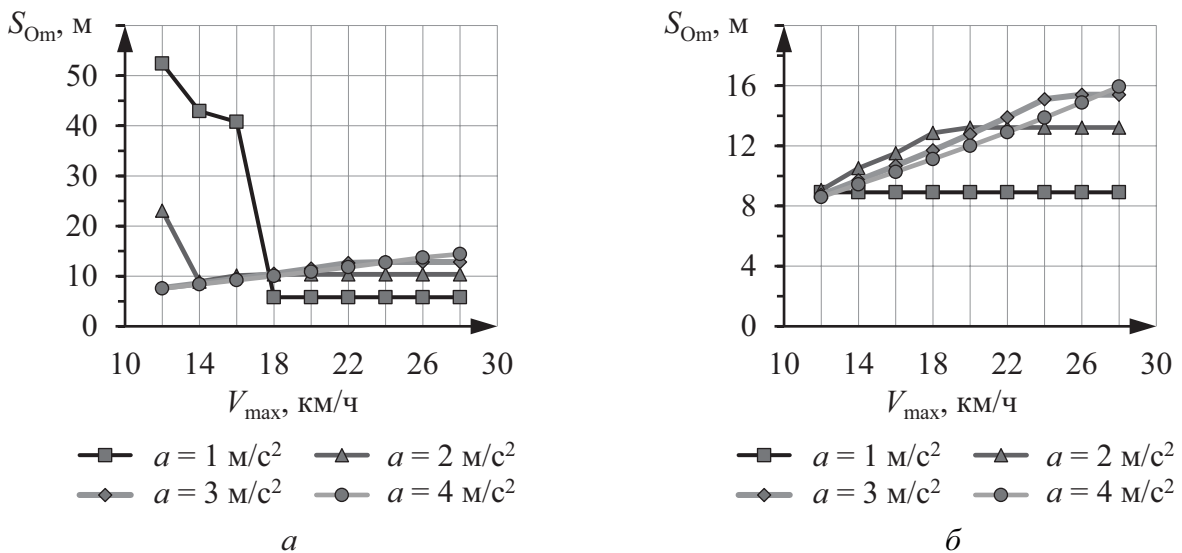


Рис. 5. Графики зависимостей минимального расстояния S_{Om} , проходимого кареткой МП РТК в направлении, противоположном надвигу, от максимальной ее скорости V_{max} при постоянной скорости надвига, равной: а — $V_H = 10$ км/ч; б — $V_H = 8$ км/ч

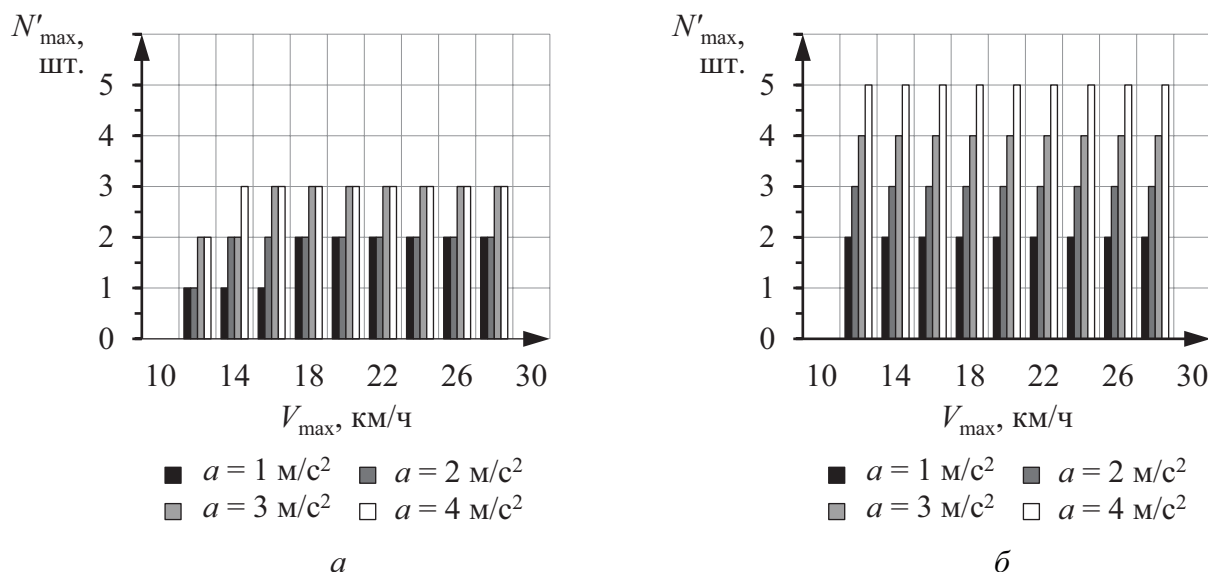


Рис. 6. Гистограммы, отражающие зависимость числа N'_{\max} правильно сформированных отцепов при наихудших условиях от максимальной скорости V_{\max} каретки МП РТК при постоянной скорости надвига, равной: *a* — $V_H = 10$ км/ч; *б* — $V_H = 8$ км/ч

Также следует отметить, что при наличии путевого датчика и реализации движения каретки МП РТК в точку, из которой необходимо начать равноускоренное движение к автосцепке, подлежащей расцепке, расстояние, проходимое в направлении надвига при наихудших условиях всегда одинаково ($S_{\text{Пmax}} = S_{\text{Пm}}$) и не зависит от величины V_{\max} .

Если полученное на основе результатов имитационного моделирования значение N'_{\max} менее указанного в столбце 3, далее осуществляют расчет фактической зоны действия МП РТК $L_{\text{РТК}}^\Phi$ с использованием формулы (5):

$$L_{\text{РТК}}^\Phi = N'_{\max} (S_{\text{Пmax}} - S_{\text{Om}}) + X_{\text{РТК}}^i + S_{\text{Пm}}. \tag{5}$$

Результат расчета записывают в столбце 13. Он может потребоваться для оценки потенциальной возможности реконструкции инфраструктуры вдоль пути надвига и соответствующей стоимости выполнения работ в случаях, когда ни один из вариантов реализации МП РТК, приведенных в табл. 3, не может быть реализован из-за несоответствия заданным эксплуатационным характеристикам.

Если для одних и тех же исходных данных (V_{\max} , a и t_{PH2}) выполняется условие $L_{\text{РТК}}^{\min} > M$, то такие варианты далее не рассматриваются, в графе 15 указывается примечание: «Превышены границы зоны РТК», а в графе 14 ставят прочерк. Если $L_{\text{РТК}}^{\min} \leq M$, то в графе 14 для случая начала движения МП РТК по данным от стационарного путевого датчика записывают результат расчета ординаты размещения такого датчика $\Delta S_{\text{д}}$. Расчет $\Delta S_{\text{д}}$ осуществляют с использованием формулы (6):

$$\Delta S_{\text{Д}} = V_{\text{Н}}^{\text{max}} \left[t_3 + \frac{V_{\text{Н}}^{\text{max}}}{2a} \right]. \quad (6)$$

Если движение МП РТК осуществляется по данным от возимого датчика, устанавливаемого непосредственно на МП РТК, то в графе 14 ставится прочерк. В графе 15 при необходимости указывают примечания, в которых, в частности, могут быть указаны типы приводов МП и манипулятора РТК, тип МП или иная необходимая для сравнения вариантов реализации РТК информация.

В результате заполнения табл. 3 определяют варианты реализации РТК, которые служат в качестве исходных данных при последующем их сравнении и выборе по стоимостному критерию.

Четвертый этап предлагаемой методики заключается в определении вариантов реализации РТК и сравнении их по стоимости выполнения (в случае тиражирования — адаптации существующих технических решений, стоимости монтажа и последующего обслуживания). К сравнению допускаются варианты реализации РТК, для которых в графе 15 табл. 3 не указано «Превышены границы зоны РТК». С учетом этого составляется табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Форма регистрации стоимости выполнения вариантов реализации РТК

$V_{\text{Н}}^{\text{max}}$, км/ч	M , м	N_{max} , шт.	№ п/п	V_{max} , км/ч	a , м/с ²	t_{PH2} , с	Вар. движ. МП РТК	$S_{\text{им}}$, м	$L_{\text{РТК}}^{\text{min}}$, м	$S_{\text{ом}}$, м	N'_{max} , шт.	$L_{\text{РТК}}^{\Phi}$, м	$\Delta S_{\text{Д}}$, м	Стоимость, млн руб.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	100	6	1	15	3	6	от стац. дат.	20	20	22	6	–	1,84	А
			2	20	3	6	от стац. дат.	20	20	24	6	–	1,84	Б

В столбце 15 указывают стоимость выполнения РТК по варианту технико-эксплуатационных характеристик, перечисленных в столбцах 1–14, в млн руб. Варианты реализации РТК при этом ранжируются по стоимости. При прочих равных вариант реализации РТК № 1 в приведенном примере является предпочтительным ввиду выполнения условия $A > B$.

По требованию заказчика может быть установлен порог стоимости выполнения РТК. В таком случае далее к анализу функционирования принимаются те варианты технико-эксплуатационных характеристик РТК, для которых стоимость выполнения ниже или равна установленному порогу.

Пятый этап предлагаемой методики проектирования предполагает осуществление имитационного моделирования функционирования РТК для определения критических режимов его работы, при которых фактическая скорость надвига должна быть ниже установленного значения V_{\max} . Имитационное моделирование осуществляют для выбранных на четвертом этапе наборов технико-эксплуатационных характеристик РТК с использованием известных математических моделей [16]. На основе результатов имитационного моделирования выбирается такой вариант, для которого вероятность пропуска автосцепки, подлежащей расцепке, при наихудших условиях окажется ниже. При необходимости выбор может быть осуществлен по паре критериев: стоимости выполнения и вероятности пропуска автосцепки, подлежащей расцепке. Также для вариантов реализации РТК возможным оказывается снижение затрат за счет сокращения протяженности зоны действия МП РТК: так, в рассмотренном примере для вариантов № 1 и № 2 по табл. 4 возможно без снижения N'_{\max} сократить протяженность $L_{\text{РТК}}^{\Phi}$ зоны действия МП РТК до 91 м.

Кроме того, на основе результатов моделирования формулируются рекомендации по снижению скорости надвига в случаях, когда в составе присутствуют последовательности подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок с числом отцепов больше установленного в рамках второго этапа проектирования значения N_{\max} .

Заключение

В исследовании сформулированы методические основы проектирования РТК для расформирования составов на сортировочной горке. Получены следующие основные результаты:

1. Определены пять основных этапов проектирования. Цель первого этапа — сбор наиболее полной информации об объекте размещения РТК и требованиях к параметрам технологического процесса, в котором предполагается осуществлять использование РТК. Цель второго этапа — анализ полученных исходных данных, определение перечня ограничений к инфраструктуре РТК, а также ограничений реализации технологического процесса с использованием разрабатываемого или проектируемого РТК. Третий этап представляет собой определение возможных с технической точки зрения при заданных ограничениях со стороны существующей инфраструктуры вариантов выполнения РТК с учетом результатов имитационного моделирования. Четвертый этап позволяет определить наиболее целесообразные с экономической точки зрения варианты выполнения РТК либо путем сравнения стоимости выполнения варианта РТК с предельной стоимостью, либо путем ранжирования вариантов по стоимости их выполнения. Цель пятого варианта — определить возможные ограничения применения РТК в реальных условиях из-за допущений, принятых при проектировании.

В результате проводимого на данном этапе имитационного моделирования формируются рекомендации по разработке и проектированию РТК, учету особенностей его применения в реальном технологическом процессе. На основе результатов имитационного моделирования получен ряд характерных зависимостей, позволяющих оценить количество подряд правильно сформированных отцепов при наихудших условиях.

2. Особенностью предлагаемых методологических основ являются возможность обоснованного выбора варианта выполнения РТК на этапе проектирования, а также учет влияния особенностей выполнения РТК на реализацию технологического процесса роспуска составов на сортировочной горке.

В последующем предложенные подходы должны лечь в основу методических указаний по разработке и проектированию РТК, предназначенных для расформирования составов на сортировочной горке.

Список источников

1. Долгий А. И. Технологии интенсивного развития ОАО «РЖД» — эффективный ответ на современные вызовы // Железнодорожный транспорт. 2025. №7. С. 6–15.
2. Андреев В. Е. Трансформация производственных процессов в эпоху цифровых технологий // Железнодорожный транспорт. 2025. №9. С. 4–6.
3. Концепция «Цифровая железнодорожная станция»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 07.11.2018 № 1049 (в ред. распоряжения ОАО «РЖД» от 05.06.2020 № 1217/р).
4. Долгий А. И. Цифровая железнодорожная станция как ключевой элемент повышения эффективности перевозочного процесса // Железнодорожный транспорт. 2025. №9. С. 7–11.
5. Цифровая железнодорожная станция — от концепции к реальному внедрению / В. Е. Андреев [и др.] // Автоматика, связь, информатика. 2023. №9. С. 2–6. DOI: 10.34649/AT.2023.9.9.001
6. Роботизация как элемент цифровой трансформации / В. В. Кудюкин [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2022. №5. С. 19–23.
7. Кудюкин В. В. Роботизация как необходимый элемент повышения эффективности процесса железнодорожных перевозок // Транспорт Российской Федерации. 2023. №1–2 (104–105). С. 13–16.
8. Охотников А. Л., Зажигалкин А. В. Обзор ключевых технологий робототехники // Проблемы искусственного интеллекта. 2025. №1 (36). С. 141–155. DOI: 10.24412/2413-7383-141-155
9. Озеров А. В., Бочков А. В. Текущее состояние и перспективы мировых исследований в области интеллектуального железнодорожного транспорта // Интеллектуальный транспорт. 2025. Т. 9, №2 (34). С. 43–66.
10. Устройство для автоматического расцепления автосцепок движущихся вагонов: патент №2410262. Российская Федерация, МПК В61G 7/04 / Москвичев О. В., Суетин В. В., Кузнецов А. Г. [и др.]; заявл. 24.11.2009; опубл. 27.01.2011. Бюл. №3.

11. Промышленный робот для автоматического расцепления движущихся грузовых вагонов: патент на полезную модель №208417. Российская Федерация, МПК В61G 7/04 / Садуев Р. Р.; заявл. 21.07.2021; опубл. 17.12.2021. Бюл. № 35.

12. Устройство для автоматического расцепления вагонов движущихся поездов: патент №2700208. Российская Федерация, МПК В61G 7/04 / Панин Ю. А., Матях Д. И.; заявл. 19.11.2018; опубл. 13.09.2019. Бюл. № 26.

13. Способ автоматического расцепления автосцепок движущихся вагонов и устройство его осуществления: патент №2728968 С1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04 / Зайков В. Н.; заявл. 16.10.2019; опубл. 03.08.2020. Бюл. № 22.

14. Система авторасцепки вагонов на сортировочной горке: патент №2450946 С1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04 / Свердлов В. Б., Акмалов С. Г., Иргер Г. Ю.; заявл. 14.12.2010; опубл. 20.05.2012. Бюл. № 14.

15. Яшин В. Н. Особенности разработки автоматизированных информационных систем с учетом показателей их эффективности // Актуальные проблемы науки и образования в современном вузе: сборник трудов IV Международной научно-практической конференции (Стерлитамак, 23–25 мая 2019 года) / отв. ред. А. Л. Галиев. Т. I. Стерлитамак: Башкирский государственный университет, 2019. С. 618–623.

16. Кудюкин В. В., Вуколов А. В., Кузьмин В. С. Имитационное моделирование работы робототехнических комплексов, предназначенных для расформирования составов на сортировочных горках // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11, № 1. С. 16–29. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-16-29

17. Кудюкин В. В., Кукушкин С. С., Хакиев З. Б. Создание устойчивых и безопасных каналов передачи информации для управления робототехническими комплексами // Труды АО «НИИАС»: сборник статей. Т. 2, вып. 11. М.: Т8 Издательские технологии, 2021. С. 209–215.

18. Описание IT-архитектуры проекта «Цифровая железнодорожная станция»: утв. зам. генерального директора ОАО «РЖД» Е. И. Чаркиным от 23.12.2024 №2570. 62 с.

19. Регламент межмашинного взаимодействия при протоколировании (документировании) технологических операций на цифровой железнодорожной станции: утв. зам. генерального директора — главным инженером ОАО «РЖД» В. Ф. Танаевым от 22.09.2025. № 1659. 204 с.

20. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учебник для вузов. 6-е изд., стер. М.: Высшая школа, 1999. 576 с.

21. Хаджимухаметова М. А. Оценка влияния характера отцепов на перерабатывающую способность сортировочных горок // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2013. Т. 3, № 1. С. 185–191.

Дата поступления: 20.02.2026

Решение о публикации: 09.04.2026

Контактная информация:

КУДЮКИН Владимир Валерьевич — заместитель генерального директора; v.kudukin@vniias.ru

КУЗЬМИН Владислав Сергеевич — кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник;

vs.kuzmin@vniias.ru

Methodology for Designing Robotic Systems for Parallel Train Break-Up on Automated Humps

V. V. Kudyukin, V. S. Kuz'min

JSC Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport (JSC NIIAS), bldg. 1, 27 Nizhegorodskaya st., Moscow, 109029, Russia

For citation: Kudyukin V. V., Kuz'min V. S. Methodology for Designing Robotic Systems for Parallel Train Break-Up on Automated Humps // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 86–104. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-86-104 (In Russian)

Abstract

Objective: to examine the design issues of robotic complexes intended for parallel train break-up on automated humps (hereinafter referred to as RTC — Robotic Technological Complex) under constraints imposed by the placement of corresponding infrastructure along the push track, as well as the uneven lengths of formed cuts. To demonstrate the necessity of considering, within the design process, the characteristics and performance quality indicators of RTC established based on simulation modeling results under worst-case conditions. **Methods:** include analysis of scientific and technical literature dedicated to issues of structural selection, design, and modeling of RTC operation; simulation modeling to determine the operational parameters of the robotic complex's mobile platform. **Results:** a methodology for designing RTC has been developed, comprising five main stages: collection and processing of primary data about the implementation object and proposed technical means; selection of implementation options considering constraints on infrastructure placement; selection of implementation options based on cost criteria and their simulation modeling to determine the maximum number of correctly consecutively formed cuts under worst-case conditions: maximum push speed, minimum cut length between automatic coupler axes, and minimum operational zone length of the mobile platform. **Practical importance:** the proposed methodology allows for selecting an RTC configuration that ensures a specified level of error probability in forming consecutively listed cuts of minimum length in the sorting list, taking into account constraints imposed by local conditions.

Keywords: marshaling yard, hump, robotic complex, train break-up from hump, design

References

1. Dolgij A. I. *Texnologii intensivnogo razvitiya OAO "RZhD" — e'ffektivny`j otvet na sovremenny`e vy`zovy`* [Russian Railways' Intensive Development Technologies — An Effective Response to Modern Challenges], *Zheleznodorozhny`j transport [Railway Transport]*, 2025, iss. 7, pp. 6–15. (In Russian)
2. Andreev V. E. *Transformaciya proizvodstvenny`x processov v e`poxu cifrovny`x texnologij* [Transforming Manufacturing Processes in the Digital Age], *Zheleznodorozhny`j transport [Railway Transport]*, 2025, iss. 9, pp. 4–6. (In Russian)
3. *Kontseptsiya "Tsifrovaya zheleznodorozhnaya stantsiya"* [Concept "Digital Railway Station"]: approved by order of JSC "Russian Railways" dated November 7, 2018 no. 1049: as amended by order of JSC "Russian Railways", dated June 5, 2020, no. 1217/r]. (In Russian)
4. Dolgij A. I. *Cifrovaya zheleznodorozhnaya stantsiya kak klyuchevoj e`lement povы`sheniya e`ffektivnosti perevozochnogo processa* [Digital Railway Station as a Key Element in Improving the Efficiency of the Transportation Process], *Zheleznodorozhny`j transport [Railway Transport]*, 2025, iss. 9, pp. 7–11. (In Russian)

5. Andreev V. E., et al. Cifrovaya zheleznodorozhnaya stantsiya — ot koncepcii k real`nomu vnedreniyu [Digital Railway Station — from Concept to Real Implementation], *Avtomatika, svyaz`, informatika [Automation, Communications, Information Technology]*, 2023, iss. 9, pp. 2–6. (In Russian)

6. Kudyukin V. V., et al. Robotizatsiya kak e`lement cifrovoj transformatsii [Robotization as an Element of Digital Transformation]. *Zheleznodorozhny`j transport [Railway Transport]*, 2022, iss. 5, pp. 19–23. (In Russian)

7. Kudyukin V. V. Robotizatsiya kak neobxodimy`j e`lement povy`sheniya e`ffektivnosti processa zheleznodorozhny`x perevozok [Robotization as a Necessary Element for Enhancing the Efficiency of Railway Transportation Process], *Transport Rossijskoj Federacii [Transport of the Russian Federation]*, 2023, iss. 1–2 (104–105), pp. 13–16. (In Russian)

8. Oxotnikov A. L., Zazhigalkin A. V. Obzor klyuchevy`x texnologij robototexniki [Overview of Key Technologies of Robotics], *Problemy` iskusstvennogo intellekta [Problems of Artificial Intelligence]*, 2025, iss. 1 (36), pp. 141–155. (In Russian)

9. Ozerov A. V., Bochkov A. V. Tekushhee sostoyanie i perspektivy` mirovy`x issledovanij v oblasti intellektual`nogo zheleznodorozhnogo transporta [The Current State and Prospects of Global Research in the Field of Intelligent Railway Transport], *Intellektual`ny`j transport [Intelligent Transport]*, 2025, vol. 9, iss. 2 (34), pp. 43–66. (In Russian)

10. Patent no. 2410262, Russian Federation, IPC B61G 7/04, Ustrojstvo dlya avtomaticheskogo rastsepleniya avtostsepok dvizhushchikhsya vagonov [Device to Automatically Disconnect Running Car Automatic Couplers], O. V. Moskvichev, et al: appl. November 24, 2009: publ. January 27, 2011, bul. no. 3. (In Russian)

11. Patent no. 208417, Russian Federation, IPC B61G 7/04, Promyshlennyj robot dlya avtomaticheskogo rastsepleniya dvizhushchikhsya gruzovykh vagonov [Industrial Robot for Automatic Uncoupling of Moving Freight Wagons], R. R. Saduev: appl. July 21, 2021: publ. 12/17/2021, bul. no. 35. (In Russian)

12. Patent no. 2700208, Russian Federation, IPC B61G 7/04, Ustrojstvo dlya avtomaticheskogo rastsepleniya vagonov dvizhushchikhsya poezdov [Device for Automatic Disengagement of Cars of Moving Trains], Yu. A. Panin, D. I. Matyax: appl. November 19, 2018: publ. September 13, 2019, bul. no. 26. (In Russian)

13. Patent no. 2728968, Russian Federation, IPC B61G 7/04, Sposob avtomaticheskogo rastsepleniya avtostsepok dvizhushchikhsya vagonov i ustrojstvo ego osushchestvleniya [Method for Automatic Disengagement of Automatic Couplings of Moving Cars and Device for Its Implementation], V. N. Zajkov: appl. October 16, 2019, publ. March 08, 2020, bul. no. 22. (In Russian)

14. Patent no. 2450946 Russian Federation, IPC B61G 7/04, Sistema avtorastsepki vagonov na sortirovochnoj gorke [Automatic System to Uncouple Cars on Hump Yard], V. B. Sverdlov, S. G. Akmalov, G. Yu. Irger: appl. December 14, 2010: publ. May 20, 2012, bul. no. 14. (In Russian)

15. Yashin V. N. Osobennosti razrabotki avtomatizirovanny`x informacionny`x sistem s uchetom pokazatelej ix e`ffektivnosti [Features of the Development of Automated Information Systems Taking into Account Their Performance Indicators], *Proceedings of Conference “Aktual`ny`e*

problemy` nauki i obrazovaniya v sovremennom vuze` [Current Issues of Science and Education in a Modern University], Sterlitamak, May 23–25, 2019, pp. 618–623. (In Russian)

16. Kudyukin V.V., et al. Imitacionnoe modelirovanie raboty` robototexnicheskix kompleksov, prednaznachenny`x dlya rasformirovaniya sostavov na sortirovochny`x gorkax [Simulation Modeling of the Robotic System Operations Designed for Parallel Train Break-Up on Automated Humps], *Avtomatika na transporte* [Transport Automation Research], 2025, vol. 11, iss. 1, pp. 16–29. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-16-29 (In Russian)

17. Kudyukin V.V., et al. Sozdanie ustojchivy`x i bezopasny`x kanalov peredachi informacii dlya upravleniya robototexnicheskimi kompleksami [Creation of Stable and Secure Information Transmission Channels for Control of Robotic Systems], *Trudy` AO "NIIAS": Sbornik statej* [Proceedings of JSC NIIAS: Collection of Articles], 2021, vol. 2, iss. 11, pp. 209–215. (In Russian)

18. Opisanie IT-arkhitektury proekta "Tsifrovaya zheleznodorozhnaya stantsiya" [Description of the IT Architecture of the "Digital Railway Station" Project], approved by Deputy General Director of JSC "Russian Railways", E. I. Charkin, dated December 23, 2024, no. 2570, 62 p. (In Russian)

19. Reglament mezhmashinnogo vzaimodeistviya pri protokolirovanii (dokumentirovanii) tekhnologicheskikh operatsii na tsifrovoi zheleznodorozhnoi stantsii [Regulation on Machine-to-Machine Interaction During Logging (Documentation) of Technological Operations at a Digital Railway Station], approved by Deputy General Director — Chief Engineer of JSC "Russian Railways", V. F. Tanaev, dated September 22, 2025, no. 1659, 204 p. (In Russian)

20. Ventcel` E. S. Teoriya veroyatnostej [Probability Theory], Moscow, Vysshaya shkola [Higher School], 1999, 576 p. (In Russian)

21. Khadzhimukhametova M. A. Otsenka vliyaniya kharaktera otsepov na pererabatyvayushchuyu sposobnost` sortirovochnykh gorok [Assessment of the Influence of Cut Characteristics on the Processing Capacity of Sorting Humps], *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern Problems of the Russian Transport Complex], 2013, vol. 3, iss. 1, pp. 185–191. (In Russian)

Received: February 20, 2026

Accepted: April 9, 2026

Author's information:

Vladimir V. KUDYUKIN — Deputy General Director; v.kudukin@vniias.ru

Vladislav S. KUZ'MIN — PhD in Engineering, Leading Research Officer; vs.kuzmin@vniias.ru