

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАСФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

КУДЮКИН Владимир Валерьевич, заместитель генерального директора; e-mail: v.kudukin@vniias.ru
ВУКОЛОВ Александр Владимирович, начальник НТК интеллектуальных систем контроля и управления; e-mail: a.vukolov@vniias.ru

КУЗЬМИН Владислав Сергеевич, канд. техн. наук, ведущий специалист Отдела технологического обеспечения и робототехники Центра роботизации технологических процессов НТК интеллектуальных систем контроля и управления; e-mail: vs.kuzmin@vniias.ru

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва

В рамках реализации Концепции «Цифровая железнодорожная станция» предполагается создание робототехнических комплексов, обеспечивающих автоматическую расцепку вагонов при роспуске железнодорожного подвижного состава на сортировочной горке. Настоящая статья посвящена вопросу выбора технико-эксплуатационных характеристик и алгоритма перемещения каретки мобильной платформы такого робототехнического комплекса. В статье приводится описание разработанной математической модели, учитывающей различные варианты перемещения каретки. С использованием разработанной модели было осуществлено сравнение различных вариантов выполнения мобильной платформы робототехнического комплекса, в том числе по количеству подряд сформированных отцепов. Моделирование показало, что увеличения числа подряд сформированных отцепов возможно достичь за счет повышения скорости и ускорения каретки мобильной платформы, а также за счет применения более сложного алгоритма перемещения каретки, требующего для своей реализации применения дополнительного путевого стационарного датчика, предназначенного для определения расстояния между текущими ординатами каретки и автосцепки, подлежащей расцепке.

Ключевые слова: сортировочная станция; сортировочная горка; робототехнический комплекс; роспуск железнодорожных составов; технико-эксплуатационные характеристики.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-16-29

▼ Введение

Автоматизация технологических процессов на железнодорожной станции требует внедрения новых технических средств, обеспечивающих среди прочего взаимодействие с элементами вагонов в рамках выполнения типовых технологических операций. К подобным средствам относятся, в том числе, робототехнические комплексы (далее — РТК), предназначенные для расцепки вагонов при расформировании составов на сортировочной горке. Такие РТК призваны с одной стороны исключить необходимость нахождения работников хозяйства перевозок в опасной зоне, а с другой — повысить скорость надвига [1].

Первостепенной задачей для разработчика таких технических средств является определение потребных величин технико-эксплуатационных

характеристик в зависимости от интенсивности протекания соответствующих процессов. Следует отметить, что в рассматриваемой области техники приводится описание достаточно большого количества прототипов и макетов, охватывающих как РТК в целом, так и отдельные их функциональные узлы и блоки. Так, в работе [2] приводится описание ранее выполненных экспериментальных исследований по определению конструкции манипулятора и модуля позиционирования с использованием макетов робототехнических комплексов в натуральную величину. В работе [3] описываются результаты структурно-функционального проектирования, направленные на разработку конструкторских решений и алгоритмов реализации управления мобильной платформой (далее — МП) такого РТК.

Изуровня техники хорошо известны различные варианты реализации технических решений для таких РТК. В работе [4] описывается стационарный вариант, который предлагает осуществлять расцепку за счет разности высот автосцепок, обеспечиваемой посредством подъема контррельсов. В работе [5] описывается стационарно размещаемый манипулятор, отличительной особенностью конструкции которого является наличие внешнего путевого датчика счета осей для определения автосцепки, подлежащей расцепке, а также модернизация самой автосцепки за счет установки на нее исполнительного механизма. Подобные технические решения ввиду необходимости модернизации подвижного состава дальнейшего развития не получили.

Намного чаще описываются решения, использующие мобильные каретки, перемещающиеся вдоль пути надвига и снабжаемые манипуляторами, с помощью которых осуществляется взаимодействие с цепью автосцепного устройства. В патентном документе [6] описывается РТК, каретка МП которого после окончания расцепки возвращается в исходную координату. В работе [7] для перемещения мобильной платформы предложено использовать дополнительную опорно-поворотную балку. В работе [8] мобильную платформу предложено разместить внутри колеи, а в качестве направляющих использовать ходовые рельсы железнодорожного пути. Подобное решение было описано и в патентном документе [9], однако в нем была решена задача повышения надежности выполнения расцепки за счет взаимодействия с цепями обоих автосцепных устройств вагонов.

Интересен и зарубежный опыт. Наиболее релевантными являются технические решения, предлагаемые китайскими авторами, хотя попытки использовать робототехнические комплексы предпринимались и в европейских странах — соответствующее решение в отношении винтовой сцепки описано в [10]. В работах [11, 12] используют зубчатую направляющую для увеличения скорости надвига. В работе [13] предложено техническое решение, совмещенное с функционалом устройства соединения тормозных шлангов.

Американские изобретатели предложили альтернативу применению направляющих — внедрение МП РТК на гусеничном ходу [14]. Однако такое решение может быть использовано только для отпуска тормозов или соединения тормозных рукавов и мало подходит для выполнения роспуска составов на сортировочной горке при высоких скоростях надвига.

Все вышеописанные работы объединяет отсутствие математического аппарата, который раскрывал бы взаимосвязь между такими основными технико-эксплуатационными характеристиками РТК для расцепки вагонов при роспуске составов на сортировочной горке, как: максимальная скорость надвига, количество подряд сформированных отцепов минимальной длины, длина зоны действия мобильной платформы робототехнического комплекса, максимальная скорость и ускорение каретки мобильной платформы. Исключением является работа [15], в которой приводятся расчетные формулы для определения числа подвижных манипуляторов (вернее сказать — кареток) МП РТК в составе РТК на один путь надвига в случае, когда каретка МП РТК всегда возвращается в некоторую заранее определенную начальную пространственную координату. Однако приведенное математическое обеспечение не позволяет определять такие важные показатели функционирования РТК, как количество подряд сформированных отцепов, протяженность зоны действия МП РТК, ордината установки стационарного датчика обнаружения автосцепки и др.

С учетом этого целью работы выбрана разработка математической модели перемещения кареток МП РТК при различных вариантах обработки железнодорожного состава, подлежащего расформированию, т.е. при различных событиях, инициирующих начало и окончание перемещения каретки МП РТК. В качестве объекта исследования выбраны РТК, предназначенные для расцепки вагонов при роспуске железнодорожных составов на сортировочной горке. В качестве предмета исследования выбрано влияние параметров РТК на количество подряд сформированных отцепов.

1. Построение модели функционирования робототехнического комплекса, предназначенного для расцепки вагонов при роспуске железнодорожного подвижного состава на сортировочной горке

1.1. Варианты перемещения каретки мобильной платформы робототехнического комплекса

Прежде, чем перейти к описанию разработанной модели, опишем основные варианты событий, инициирующих начало и окончание перемещения каретки МП РТК, а следовательно, и варианты перемещения самой каретки МП РТК (рис. 1). На рис. 1 приведены следующие обозначения:

V_H — скорость надвига (принимается постоянной в интервале отдельной технологической операции по выполнению расцепки), в м/с;

V_{max} — максимальная скорость каретки МП РТК, в м/с;

t_3 — время задержки на начало движения каретки МП РТК после ее стоянки / остановки, в секундах (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.);

t_p — время разгона каретки МП РТК до некоторой фактической скорости $V \leq V_{max}$, в секундах (на рис. 1 показан вариант, при котором $V = V_{max}$);

t_{pH1} — время равномерного движения каретки МП РТК с максимальной скоростью V_{max} , в секундах (если фактическая скорость V каретки МП РТК в течение отдельной технологической операции строго меньше V_{max} , то t_{pH1} приравнивается к нулю, поскольку каретка будет перемещаться только равноускоренно);

t_{T1} — время торможения от некоторой фактической скорости V до скорости надвига V_H , в секундах;

t_{pH2} — время равномерного движения каретки МП РТК со скоростью надвига V_H , в секундах (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 и далее при моделировании будет приниматься произвольным и уточняться при выборе типа манипулятора и его привода);

t_{T2} — время торможения от V_H до нуля, в секундах;

t_{pO} — время разгона каретки МП РТК при движении в обратном направлении (здесь и далее под движением в обратном направлении будем считать движение каретки МП РТК в сторону парка приема), в секундах;

t_{pHO} — время равномерного движения каретки МП РТК в обратном направлении, в секундах ($t_{pHO} \geq 0$);

t_{TO} — время торможения каретки МП РТК при движении в обратном направлении, в секундах ($t_{TO} = t_{pO}$);

t_{Π} — суммарное время на выполнение движения каретки МП РТК в прямом направлении (здесь и далее под движением каретки МП РТК в прямом направлении будем считать движение по направлению к сортировочному парку);

t_{Σ} — суммарное время, затрачиваемое на перемещение каретки МП РТК в прямом и обратном направлении, т.е. за один цикл функционирования РТК.

Первый вариант перемещения (рис. 1, а) подразумевает, что каретка МП РТК осуществляет подготовку, продолжительность которой равна t_3 , и начинает движение только в случаях, когда ордината нахождения текущей автосцепки, подлежащей расцепке X_H^i равна или больше текущей ординаты каретки МП РТК $X_{РТК}^i$ (здесь и далее имеется ввиду ордината возимого датчика, установленного на каретке МП РТК). Чем больше разность ординат, которую далее будем обозначать как X_0 , тем больше расстояние S_{Π} , проходимое кареткой МП РТК в прямом направлении. Величина X_0 может быть равна нулю, если каретка МП РТК находится в точке начала отсчета ординат, или быть отличной от нуля в случае, когда автосцепка была обнаружена внешним стационарным датчиком, смещенным относительно текущей ординаты каретки МП РТК в сторону сортировочного

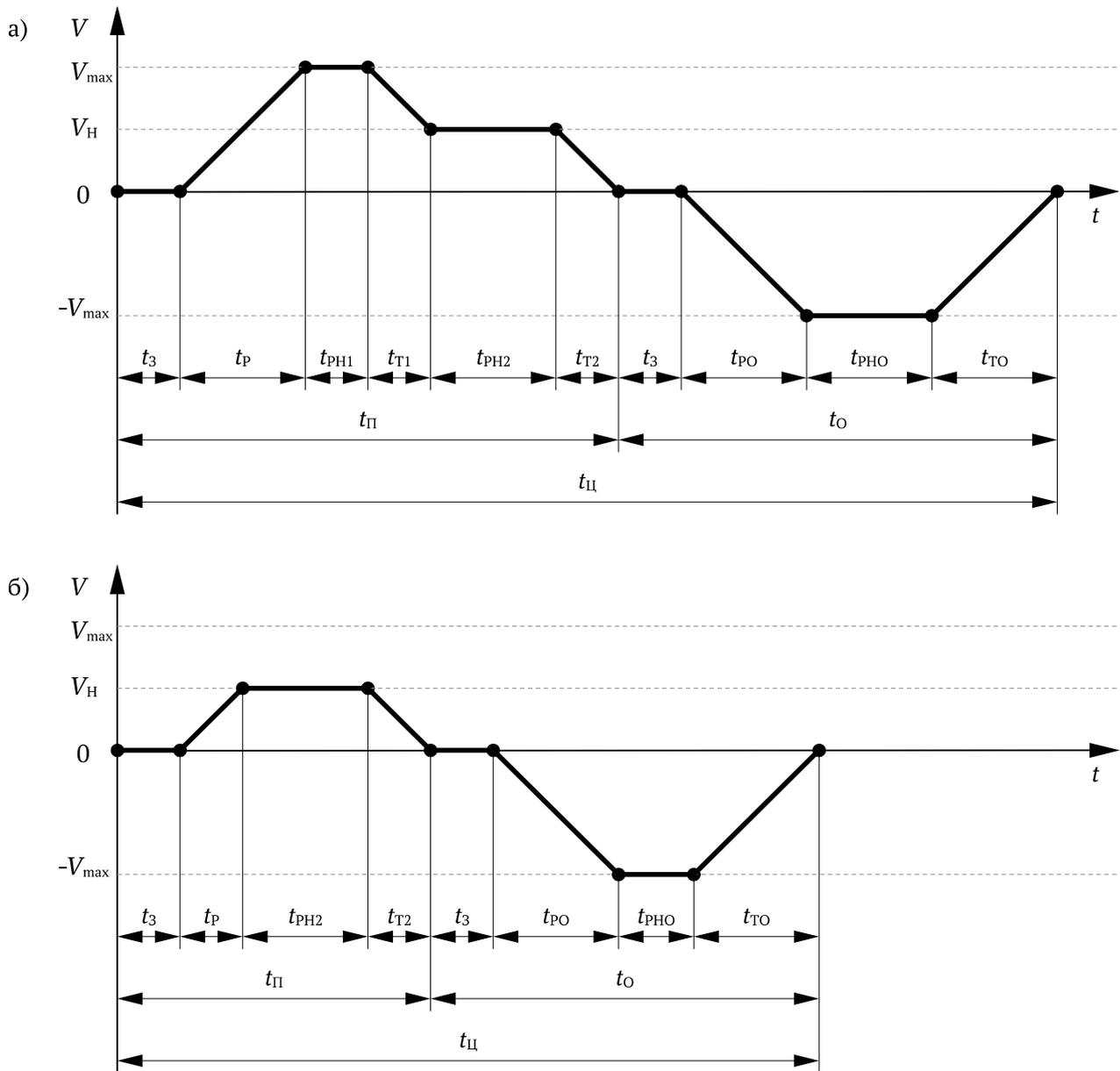


Рис. 1. Изменение скорости МП РТК во время выполнения технологических операций

парка, или же возимым на каретке МП РТК датчиком при движении каретки МП РТК в противоположном направлении.

Второй вариант перемещения (рис. 1, б) подразумевает, что каретка МП РТК начинает равноускоренное движение при условии, что $X_H^i < X_{РТК}^i$. При этом расстояние, проходимое кареткой МП РТК в прямом направлении, оказывается меньше, чем в первом варианте перемещения каретки РТК, так как отсутствует необходимость нагона автосцепки. Отметим, что такой вариант возможен, если имеют место стационарные (т.е. устанавливаемые не на каретке МП РТК) датчики, которые могут

получать информацию о текущей ординате следующей автосцепки, подлежащей расцепке, относительно начала ординат МП РТК. При этом такие датчики должны быть смещены относительно начала ординат МП РТК.

Движение каретки МП РТК в обратном направлении может осуществляться на различное расстояние в зависимости от варианта выбора точки прицельного торможения для движения каретки МП РТК в обратном направлении. Всего возможно четыре таких варианта:

1) безусловный возврат в начало ординат МП РТК (под безусловным следует понимать, что РТК вплоть до возврата в начало ординат

не предпринимает попыток расцепки заданных автосцепок, которые следуют мимо него);

2) возврат до обнаружения датчиком, установленным на каретке МП РТК, следующей автосцепки, подлежащей расцепке;

3) возврат каретки МП РТК и его остановка в точке, где будет находиться следующая автосцепка, подлежащая расцепке;

4) возврат каретки МП РТК и его остановка в точке, откуда может быть начато равноускоренное движение к следующей автосцепке, подлежащей расцепке.

Варианты 2 и 3 имеют место только при движении каретки МП РТК по алгоритму, приведенному на рис. 1, а, а вариант 4 — только при движении каретки МП РТК по алгоритму, приведенному на рис. 1, б (в противном случае начальная ордината каретки МП РТК в новом цикле будет больше, чем по варианту 2 или 3, что будет приводить к снижению эффективности функционирования РТК). В свою очередь вариант 1 является универсальным для обоих вариантов перемещения каретки МП РТК.

1.2. Ограничения и допущения при построении математической модели движения каретки мобильной платформы

Отметим следующие ограничения и допущения, принятые при разработке модели и последующем моделировании:

1. МП РТК и размещенные на ней устройства, а также автосцепки, подлежащие расцепке, представляют собой материальные точки, перемещающиеся вдоль одной оси; МП РТК может перемещаться в обоих направлениях; автосцепки, подлежащие расцепке, могут перемещаться только в одном направлении; направление оси совпадает с направлением движения автосцепок; за нулевую ординату принято начало зоны действия МП РТК (наиболее удаленная от горба горки ордината зоны действия МП РТК).

2. Для первого варианта движения каретки МП РТК (рис. 1, а) справедливо следующее соотношение скоростей: $V_H < V_{\max}$. Для второго варианта движения МП РТК (рис. 1, б) справедливо следующее соотношение скоростей: $V_H \leq V_{\max}$.

3. МП РТК не начинает движение, если:

- не выполняется соответствующее ее варианту движения в прямом направлении условие по п. 2;
- разность между протяженностью зоны действия МП РТК и текущей ординатой каретки МП РТК меньше расстояния, которое потребуется пройти в прямом направлении для нагона и расцепки автосцепки, а также последующей остановки каретки МП РТК: $L_{РТК} - X_{РТК}^i < S_{\Pi}$.

4. Фактическая протяженность зоны действия РТК $L_{РТК}$ должна быть не менее $L_{РТК}^{\min}$.

5. Автосцепное устройство всегда полностью исправно.

6. Величины вероятностей ошибок первого и второго рода для системы технического зрения при решении задачи позиционирования манипулятора и регистрации факта выполнения расцепки равны нулю.

7. Наихудшими условиями функционирования МП РТК следует считать:

- максимальную скорость надвига V_H^{\max} ;
- минимальную длину отцепа $L_{ОТЦ}^{\min}$, которая может быть принята равной 1 условной единице длины, т.е. 14 м (по стандартной длине полувагона по осям автосцепок);
- минимальную протяженность зоны действия МП РТК $L_{РТК}^{\min}$, равную максимальному расстоянию, проходимому МП РТК в прямом направлении S_{Π}^{\max} , получаемую при нулевой начальной ординате МП РТК при V_H^{\max} .

8. Влияние природно-климатических условий на величину максимального расстояния, проходимого МП РТК в прямом S_{Π}^{\max} и обратном S_{Π}^{\max} направлениях, не учитывается.

С учетом вышеизложенного далее разработаем модель, описывающую движение МП РТК.

1.3. Математическая модель движения каретки мобильной платформы

Для определения временных параметров перемещения каретки МП РТК до момента времени, когда она и автосцепка будут находиться в состоянии покоя друг относительно друга, может быть записана система уравнений (1):

$$\begin{cases} S_H = X_0 + V_H[t_3 + t_P + t_{PH1} + t_{T1}], \\ S_H = \frac{at_P^2}{2} + V_{max}t_{PH1} + at_P t_{T1} - \frac{at_{T1}^2}{2}; \end{cases} \quad (1)$$

где S_H — ордината автосцепки или каретки МП РТК в момент, когда ординаты и скорости мобильной платформы РТК и автосцепки равны, в метрах;

a — ускорение МП РТК, в м/с².

С учетом (1) значения t_P , t_{PH1} , t_{T1} и t_{T2} могут быть определены с использованием выражений (2)–(5) соответственно:

$$t_P = \begin{cases} \frac{V_H^\Phi}{a} + \sqrt{\frac{V_H^\Phi}{a} \left[\frac{V_H^\Phi}{2a} + t_3 \right] + \frac{X_0}{a}}, \\ \text{если} \left(V_H^\Phi + a \sqrt{\frac{V_H^\Phi}{a} \left[\frac{V_H^\Phi}{2a} + t_3 \right] + \frac{X_0}{a}} \right) > V_{max}, \\ \frac{V_{max}}{a}, \\ \text{если} \left(V_H^\Phi + a \sqrt{\frac{V_H^\Phi}{a} \left[\frac{V_H^\Phi}{2a} + t_3 \right] + \frac{X_0}{a}} \right) \leq V_{max}; \end{cases} \quad (2)$$

$$t_{PH1} = \begin{cases} \frac{X_0 + V_H^\Phi t_3 - \frac{(V_H^\Phi)^2}{2a} - \frac{V_{max}}{a} [V_{max} - 2V_H]}{V_{max} - V_H^\Phi}, \\ \text{если } t_P = \frac{V_{max}}{a}, \\ 0, \text{ если } t_P < \frac{V_{max}}{a}; \end{cases} \quad (3)$$

$$t_{T1} = \frac{at_P - V_H^\Phi}{a}, \quad (4)$$

$$t_{T2} = \frac{V_H^\Phi}{a}. \quad (5)$$

Фактическое расстояние, проходимое кареткой МП РТК при движении в прямом направлении, в данном случае будет определяться выражением (6), а максимальное расстояние — выражением (7):

$$\begin{aligned} S_{\Pi}^\Phi &= V_{max}t_{PH1} + at_P t_{T1} + \\ &+ V_H^\Phi (t_{PH2} + t_{T2}) + \frac{a[t_P^2 - t_{T1}^2 - t_{T2}^2]}{2}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} S_{\Pi}^{max} &= V_{max}t_{PH1} + at_P t_{T1} + V_H^{max} (t_{PH2} + t_{T2}) + \\ &+ \frac{a[t_P^2 - t_{T1}^2 - t_{T2}^2]}{2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Теперь рассмотрим перемещение каретки МП РТК в случае, когда начало движения осуществляется до проследования автосцепки (рис. 1, б). Расстояние S_D от точки установки датчика до начала ординат мобильной платформы РТК можно определить с использованием формулы (8):

$$S_D = V_H^{max} \left[t_3 + \frac{V_H^{max}}{2a} \right]. \quad (8)$$

Коррекция времени задержки на начало движения Δt при снижении скорости надвига до некоторого фактического значения V_H^Φ может быть определена с использованием выражения (9):

$$\Delta t = \frac{V_H^{max}}{V_H^\Phi} \left[t_3 + \frac{V_H^{max}}{2a} \right] - \frac{V_H^\Phi}{2a} - t_3. \quad (9)$$

При таком характере движения параметры t_{PH1} и t_{T1} приравняются к нулю, параметр t_{PH2} равен времени выполнения технологических операций манипулятором РТК, а параметры t_P и t_{T2} могут быть определены с использованием выражения (10):

$$t_P = t_{T2} = \frac{V_H^\Phi}{a}. \quad (10)$$

Фактическое расстояние, проходимое мобильной платформой РТК при движении в прямом направлении, в данном случае будет определяться выражением (11), а максимальное расстояние — выражением (12):

$$S_{\Pi}^{\Phi} = V_{\text{H}}^{\Phi} (t_{\text{PH2}} + t_{\text{P}}), \quad (11)$$

$$S_{\Pi}^{\text{max}} = V_{\text{H}}^{\text{max}} (t_{\text{PH2}} + t_{\text{P}}). \quad (12)$$

Подчеркнем, что формулы (7) и (12) следует использовать при определении минимальной протяженности зоны действия МП РТК.

Теперь рассмотрим движение каретки МП РТК в обратном направлении. Отметим, что вне зависимости от модели движения каретки МП РТК в обратном направлении время разгона t_{PO} и время торможения t_{TO} мобильной платформы в обратном направлении равны между собой и могут быть определены в простейшем случае возврата каретки МП РТК в начало ординат с использованием выражения (13):

$$t_{\text{PO}} = t_{\text{TO}} = \begin{cases} \sqrt{\frac{X_{\text{РТК}}^i}{a}}, & \text{если } \left(\frac{X_{\text{РТК}}^i}{V_{\text{max}}} - \frac{V_{\text{max}}}{a} \right) = 0, \\ \frac{V_{\text{max}}}{a}, & \text{если } \left(\frac{X_{\text{РТК}}^i}{V_{\text{max}}} - \frac{V_{\text{max}}}{a} \right) > 0. \end{cases} \quad (13)$$

В остальных вариантах алгоритма движения МП РТК в обратном направлении данные параметры могут быть определены с использованием выражения (14):

$$t_{\text{PO}} = t_{\text{TO}} = \begin{cases} -\frac{V_{\text{H}}^{\Phi}}{a} + \sqrt{\left(\frac{V_{\text{H}}^{\Phi}}{a} \right)^2 + P_1 Q_1}, & \text{если } \left(\frac{Q_1 - P_2}{V_{\text{max}} + V_{\text{H}}^{\Phi}} \right) = 0, \\ \frac{V_{\text{max}}}{a}, & \text{если } \left(\frac{Q_1 - P_2}{V_{\text{max}} + V_{\text{H}}^{\Phi}} \right) > 0; \end{cases} \quad (14)$$

где

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

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

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

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

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

$\sum L_{\text{отц}}$ — сумма длин отцепов, которые мобильная платформа РТК пропустит в процессе следования в обратном направлении.

Время равномерного движения каретки МП РТК в обратном направлении может быть определено с использованием выражения (15), а фактическое расстояние, проходимое мобильной платформой в обратном направлении, может быть определено по формуле (16):

$$t_{\text{PHO}} = \frac{X_{\text{РТК}}^i - P_2}{V_{\text{max}} + V_{\text{H}}^{\Phi}}, \quad (15)$$

$$S_{\text{O}}^{\Phi} = at_{\text{PO}}^2 + V_{\text{max}} t_{\text{PHO}}. \quad (16)$$

Отметим, что минимальное расстояние, проходимое кареткой МП РТК в обратном направлении, может быть определено при таком граничном (наихудшем) условии, как максимальная величина скорости надвига.

В заключении построения модели отметим, что в случае, когда текущая разность между текущей ординатой каретки МП РТК $X_{\text{РТК}}^i$ и фактическим расстоянием V_{H}^{Φ} , проходимым кареткой МП РТК в обратном направлении, для рассматриваемой $\sum L_{\text{отц}}$ окажется отрицательной, следует осуществлять расчет такого движения каретки МП РТК в обратном направлении, как движение в начало ординат.

2. Результаты моделирования

Для анализа влияния максимальной скорости надвига, максимальной скорости, ускорения и варианта движения МП РТК на минимальную протяженность зоны действия МП РТК были построены зависимости, показанные на рис. 2, 3 и 4 соответственно.

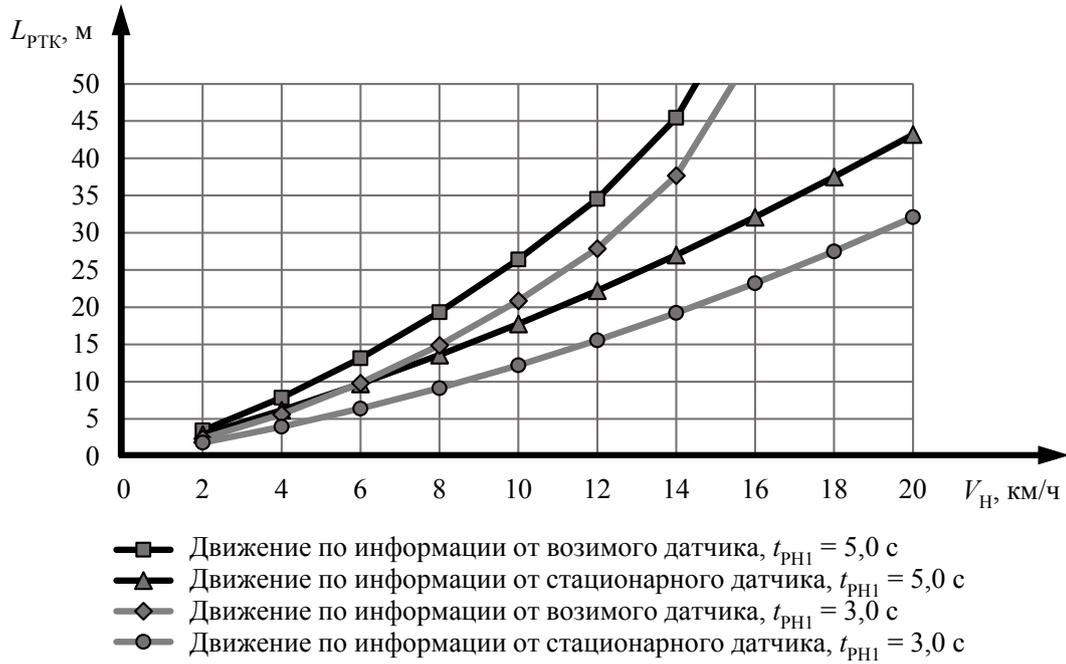


Рис. 2. Результаты моделирования влияния максимальной скорости надвига на протяженность зоны действия МП РТК ($t_3 = 0,2$ с, $t_{PH2} = 5,0$ с, $a = 2$ м/с², $V_{max} = 20$ км/ч)

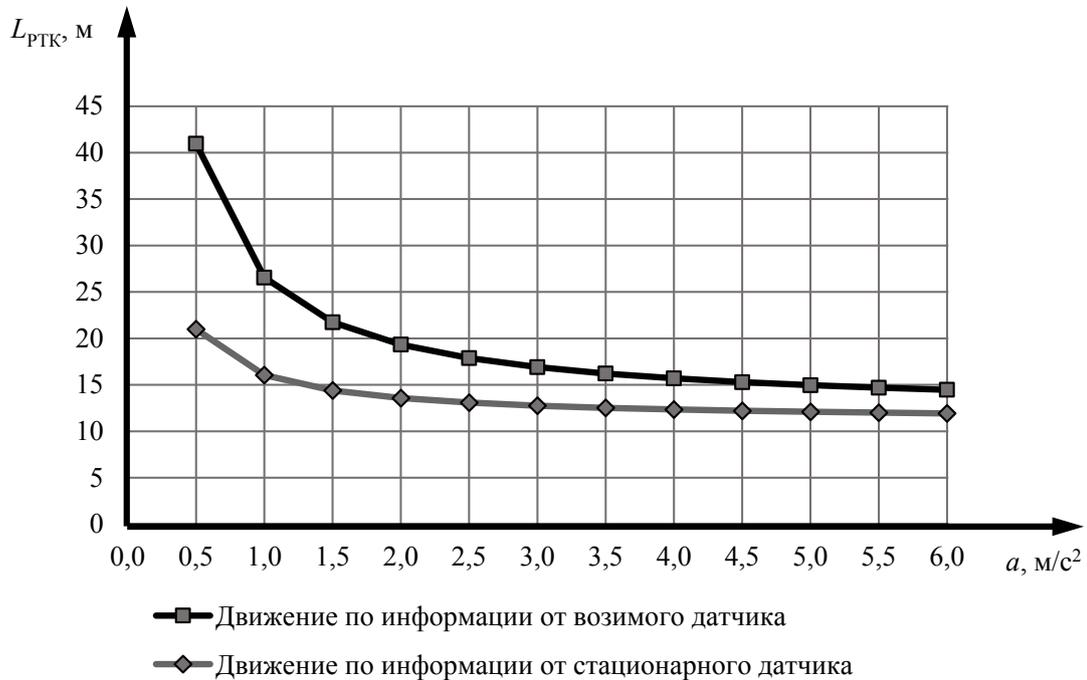


Рис. 3. Результаты моделирования влияния ускорения МП РТК на протяженность зоны действия МП РТК ($t_3 = 0,2$ с, $t_{PH2} = 5,0$ с, $V_{max} = 20$ км/ч, $V_H = 8$ км/ч)

На рис. 5 показана зависимость разности ординат начала зоны действия МП РТК и размещения стационарного путевого датчика от максимальной скорости надвига при различных величинах ускорения a МП РТК. На рис. 6

представлена серия зависимостей времени задержки на начало движения, формируемой при наличии разности между максимальной и фактической (текущей) скоростями надвига. Для анализа влияния начальной ординаты МП

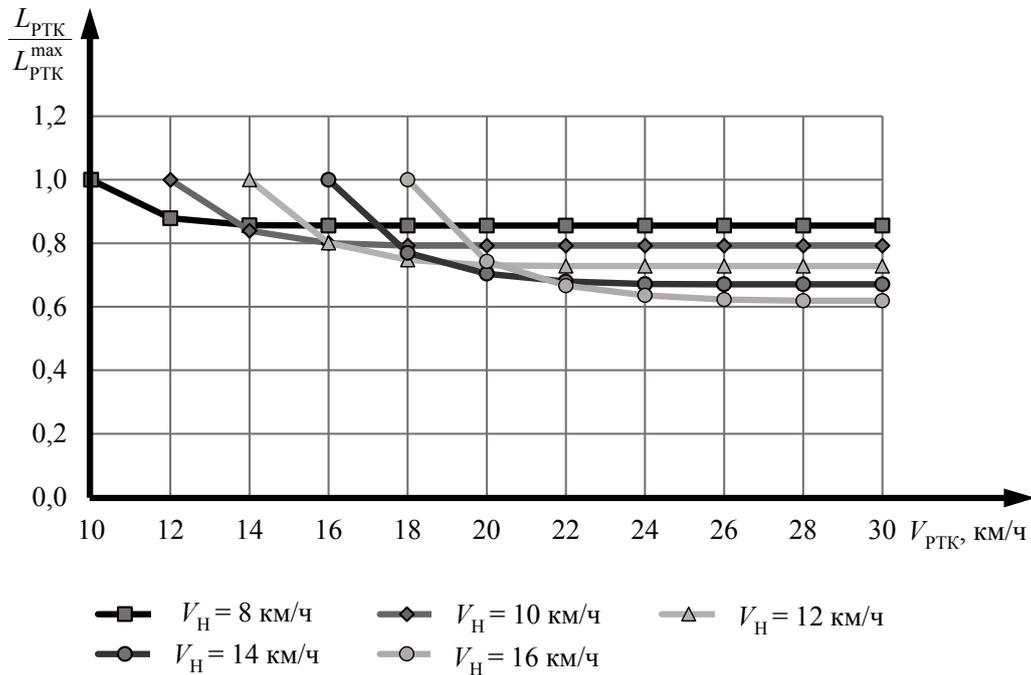


Рис. 4. Результаты моделирования влияния максимальной скорости МП РТК на протяженность зоны действия МП РТК ($t_3 = 0,2$ с, $t_{PH2} = 5,0$ с)

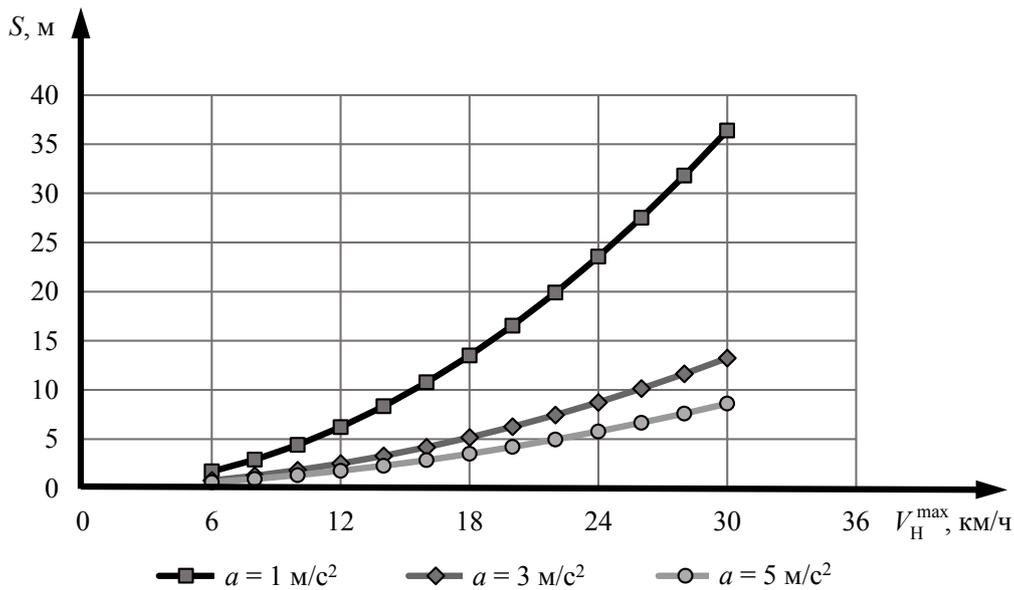


Рис. 5. Зависимость разности ординат начала зоны действия МП РТК и размещения стационарного путевого датчика от максимальной скорости надвига

РТК на количество подряд сформированных отцепов при произвольно заданных параметрах движения МП РТК построен ряд зависимостей, приведенных на рис. 7.

Из результатов моделирования, приведенных на рис. 2, следует, что сокращение зоны действия МП РТК (а также расстояния, проходимого кареткой МП РТК при ее движении в прямом

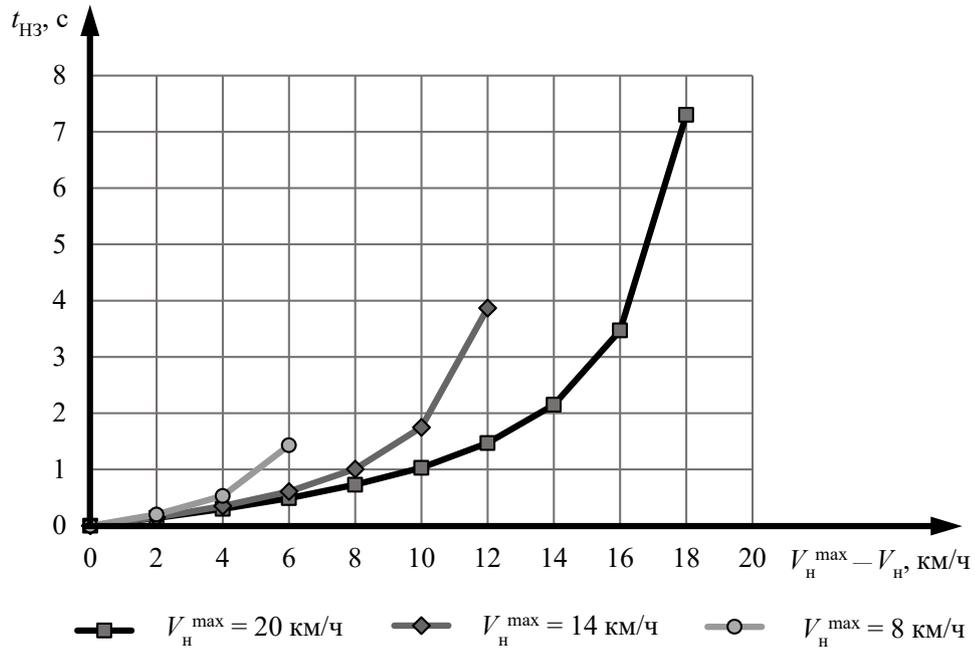


Рис. 6. Зависимость времени задержки на начало движения МП РТК от разности между максимальной и фактической скоростями надвига

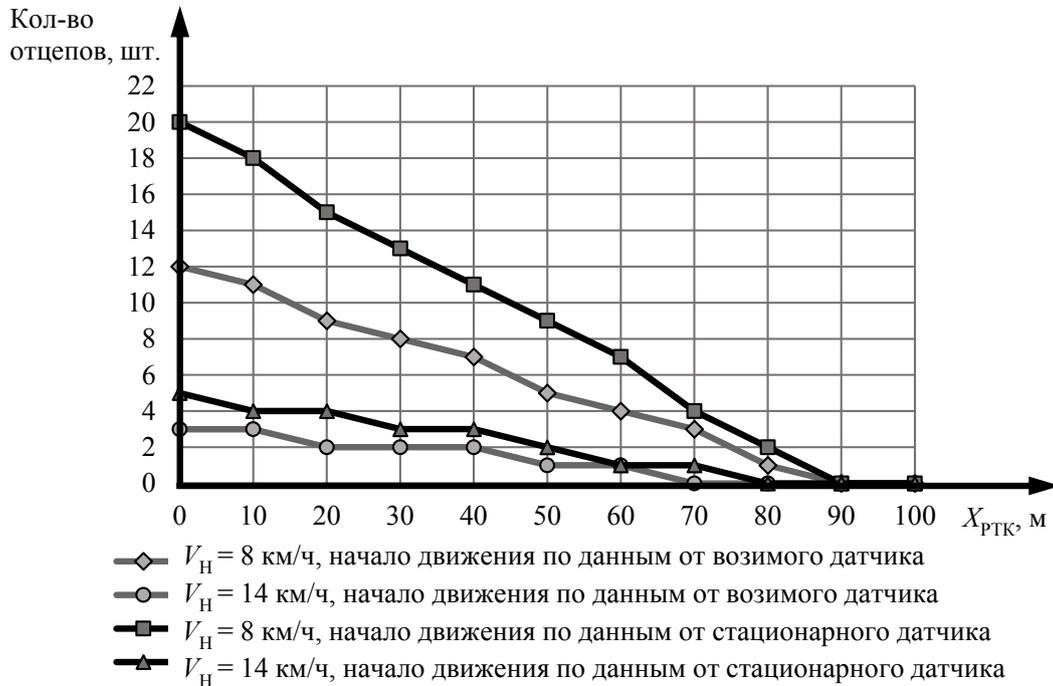


Рис. 7. Влияние начальной ординаты МП РТК на количество подряд сформированных отцепов при возврате МП РТК до обнаружения автосцепки, подлежащей расцепке, возимым датчиком или до достижения ординаты автосцепки, подлежащей расцепке, получаемой по данным от внешнего датчика
 $(t_3 = 0,2$ с, $t_{PH2} = 5,0$ с, $a = 2$ м/с², $V_{\max} = 20$ км/ч, $L_{РТК} = 100$ м)

направлении) возможно за счет использования стационарного путевого датчика и сокращения времени выполнения технологических операций с использованием манипулятора и системы технического зрения. Из результатов моделирования, приведенных на рис. 3, следует, что увеличение ускорения также приводит к сокращению потребной зоны действия МП РТК.

Из результатов моделирования, приведенных на рис. 4, следует, что увеличение максимальной скорости каретки МП РТК при малых скоростях надвига не позволяет существенно сократить минимальную протяженность зоны действия МП РТК. Так, при скорости надвига в 8 км/ч протяженность зоны действия МП РТК сокращается при максимальной скорости 30 км/ч не более чем на 14 % в относительной величине и на 3,26 м — в абсолютной. Однако с увеличением максимальной скорости надвига сокращение зоны действия МП РТК становится существеннее. Так, последующее увеличение максимальной скорости надвига до 14 км/ч приводит к сокращению протяженности зоны действия МП РТК за счет увеличения ее максимальной скорости до 30 км/ч уже на 32,9 %, или 21,25 м, а при скорости надвига 16 км/ч — на 38,1 %, или 32,68 м. С учетом этого при проектировании РТК следует руководствоваться не текущими, а перспективными (потребными) значениями скорости надвига.

Из результатов моделирования, приведенных на рис. 5, видно, что увеличение ускорения каретки МП РТК позволяет существенно сократить разность ординат между началом зоны действия МП РТК и местом установки стационарного путевого датчика для обнаружения автосцепок при одной и той же максимальной скорости надвига. Из данных результатов также следует, что разность между максимальной и фактической скоростями надвига может быть компенсирована за счет задержки на начало движения каретки МП РТК в случае, когда она осуществляет до взаимодействия с автосцепкой, подлежащей расцепке, только равноускоренное движение. Кроме того, график указывает, что чем больше разница между максимальной и фактической скоростями надвига, тем больше времени у каретки МП РТК на движение в обратном направлении.

Из результатов моделирования, приведенных на рис. 7, следует, что увеличение зоны действия позволяет увеличить количество подряд сформированных отцепов минимальной длины при прочих равных. Кроме того, из соответствующих результатов моделирования следует, что целесообразно применять алгоритмы движения МП РТК, использующие данные о пространственных координатах автосцепки, подлежащей расцепке, от внешних путевых датчиков.

С учетом полученных результатов далее для нужд проектирования требуется получить расчетные выражения для определения максимального количества подряд сформированных отцепов при заданных характеристиках РТК.

3. Определение максимального количества подряд сформированных отцепов при заданных характеристиках РТК

Исходя из анализа особенностей движения кареток МП РТК может быть получена формула (17), определяющая максимальное количество N подряд формируемых отцепов одной длины при заданных $L_{РТК}$ и $X_{РТК}^i$, а также при условии, что $L_{РТК} > S_{П} > S_{О}$:

$$N = \left\lfloor \frac{L_{РТК} - X_{РТК}^i - S_{П}}{S_{П} - S_{О}} \right\rfloor. \quad (17)$$

Для формулы (17) справедливы следующие допущения и ограничения:

- $S_{П}$ — расстояние, проходимое кареткой МП РТК в прямом направлении при обслуживании только одной автосцепки, подлежащей расцепке;
- $S_{О}$ — расстояние, проходимое кареткой МП РТК в обратном направлении в ожидании начала движения в прямом направлении за следующей автосцепкой, подлежащей расцепке (между двумя подряд следующими автосцепками, подлежащими расцепке);
- каретка МП РТК мгновенно достигает максимальной скорости при движении в обратном направлении, а $S_{О}$ не зависит от $S_{П}$.

Подставляя в (17) выражения (6), (11) и (16), получим следующую формулу (18):

$$N = \begin{cases} \left[\frac{L_{РТК} - X_{РТК}^{i-1} - \left[V_{\max} t_{PH1} + at_P t_{T1} + V_H^\Phi (t_{PH2} + t_{T2}) + \frac{a[t_P^2 - t_{T1}^2 - t_{T2}^2]}{2} \right]}{\left[V_{\max} t_{PH1} + at_P t_{T1} + V_H^\Phi (t_{PH2} + t_{T2}) + \frac{a[t_P^2 - t_{T1}^2 - t_{T2}^2]}{2} \right] - \left[at_{PO}^2 + V_{\max} t_{PHO} \right]} \right], & \text{если } X_H^i \geq X_{РТК}^i, \\ \left[\frac{L_{РТК} - X_{РТК}^{i-1} - \left[V_H^\Phi (t_{PH2} + t_P) \right]}{\left[V_H^\Phi (t_{PH2} + t_P) \right] - \left[at_{PO}^2 + V_{\max} t_{PHO} \right]} \right], & \text{если } X_H^i < X_{РТК}^i. \end{cases} \quad (18)$$

Для формулы (18) справедливы те же ограничения и допущения, что и для формулы (17). Отметим, что при $S_{\Pi} \leq S_O$ все отцепы одной длины формируются правильно, т.е. в соответствии с сортировочным листком.

Из результатов моделирования и формулы (18) следует, что наибольшего числа подряд сформированных отцепов возможно добиться путем:

- уменьшения скорости надвига;
- увеличения максимальной скорости и ускорения каретки РТК (сокращение S_{Π} и увеличение S_O);
- использования в дополнение к возимому на каретке МП РТК датчику путевого стационарного датчика, обеспечивающего получение информации о следующей автосцепке, подлежащей расцепке, без дополнительного перемещения каретки МП РТК;
- увеличения количества кареток МП РТК, обслуживающих один путь надвига.

Отметим, что первый вариант реализации движения каретки МП РТК накладывает при необходимости обеспечения высоких значений эксплуатационных показателей существенные ограничения на протяженность зоны действия РТК и расстояние S_O , проходимое кареткой МП РТК в обратном направлении. С учетом этого более предпочтительным на стадии разработки и проектирования выглядит увеличение максимальной скорости и ускорения каретки РТК, а также применение дополнительного путевого стационарного датчика, обеспечивающего получение информации о следующей автосцепке, подлежащей расцепке.

Заключение

В результате выполнения работы создана математическая модель перемещения кареток МП РТК при различных событиях,

инициирующих начало и окончание перемещения каретки МП РТК.

На основе анализа результатов моделирования возможно сформулировать следующие основные выводы:

1. При проектировании РТК следует стремиться к сокращению времени задержки на начало движения каретки МП РТК и времени выполнения технологических операций с использованием манипулятора, размещаемого на каретке МП РТК с тем, чтобы сокращать протяженность зоны действия МП РТК, а также расстояния, проходимого кареткой МП РТК при движении в прямом направлении. Для этого требуется определить и осуществить рациональный выбор телекоммуникационного оборудования РТК, его МП и приводов манипуляторов.

2. При выборе привода МП РТК следует стремиться к увеличению максимальной скорости и ускорения МП. Это позволит как сократить расстояние, проходимое МП РТК в прямом направлении, так и сократить время на движение МП РТК в обратном направлении.

3. Сравнение вариантов выполнения МП РТК при ее разработке, проектировании или формировании к ней технических требований должно быть осуществлено с использованием имитационного моделирования, базирующегося на разработанной математической модели.

4. Максимальную протяженность зоны действия РТК следует выбирать с учетом результатов статистического анализа сортировочных листков на предмет частоты возникновения подряд идущих отцепов минимальной длины. В случае, когда количество таких подряд следующих отцепов минимальной длины в фактическом сортировочном листке превышает выбранный при проектировании показатель,

следует обеспечивать дополнительные меры для исключения пропуска РТК автосцепок, подлежащих расцепке.

Приведенные результаты предполагается использовать при разработке технических требований на РТК, а также указаний по их проектированию и пуско-наладочным работам.

Перспективными направлениями исследований в данной области следует считать уточнение зависимости количества подряд сформированных отцепов от природно-климатических условий, а также оценку влияния различных мер, направленных на исключение пропуска РТК автосцепок, подлежащих расцепке, на эксплуатационные показатели сортировочной горки и сортировочной станции в целом. ▲

Список источников

1. Дудоров Е. А. Робототехнические комплексы для обслуживания подвижного состава / Е. А. Дудоров, К. А. Котова, В. В. Кудюкин, И. Г. Жиденко // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. — 2022. — № 1(57). — С. 50–55.
2. Кудюкин В. В. Роботизация как элемент цифровой трансформации / В. В. Кудюкин, Е. А. Дудоров, А. В. Вуколов, К. А. Котова // Железнодорожный транспорт. — 2022. — № 5. — С. 19–23.
3. Дудоров Е. А. Система управления манипулятором робототехнического комплекса для обслуживания механизмов сцепки и тормозной системы железнодорожных вагонов / Е. А. Дудоров, К. А. Котова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. — 2021. — Т. 12, № 1. — С. 58–64.
4. Суюнбаев Ш. М. Устройство по автоматической расцепке вагонов при расформировании составов на сортировочной горке / Ш. М. Суюнбаев // Материалы первой международной Научно-технической конференции «железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы»: материалы Первой Международной научно-технической конференции (Ташкент, 20–23 апреля 2022 г.). Ташкент, 20–23 апреля 2022 года. — Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), 2022. — С. 161–165.
5. Патент № 2410262 С1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04. Устройство для автоматического расцепления автосцепок движущихся вагонов: № 2009143451/11: заявл. 24.11.2009; опубл. 27.01.2011 / О. В. Москвичев, В. В. Суетин, А. Г. Кузнецов [и др.]; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (СамГУПС). — 6 с.
6. Патент на полезную модель № 208417 U1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04. Промышленный робот для автоматического расцепления движущихся грузовых вагонов: № 2021121688: заявл. 21.07.2021; опубл. 17.12.2021 / Р. Р. Садуев. — 8 с.
7. Патент № 2700208 С1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04. Устройство для автоматического расцепления вагонов движущихся поездов: № 2018140628: заявл. 19.11.2018; опубл. 13.09.2019 / Ю. А. Панин, Д. И. Матях; заявитель Акционерное общество Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (АО «ВНИКТИ»). — 11 с.
8. Патент № 2728968 С1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04. Способ автоматического расцепления автосцепок движущихся вагонов и устройство его осуществления: № 2019132718: заявл. 16.10.2019; опубл. 03.08.2020 / В. Н. Зайков; заявитель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». — 12 с.
9. Патент на полезную модель № 216043 U1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04. Устройство автоматического расцепления вагонов: № 2022128548: заявл. 02.11.2022; опубл. 16.01.2023 / А. А. Сергеев, А. А. Заец, А. В. Дубовицкий [и др.]; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева» Министерства обороны Российской Федерации. — 9 с.
10. Патент 3095666 В1 Европейское патентное ведомство, МПК В61G1/24. Vorrichtung zum entkuppeln einer langgemachten schraubenkupplung [Устройство для расцепления длинной винтовой сцепки]; № 16166741.5: заявл. 22.04.2016; опубл. 23.11.2016 / Patrick Harrer, Mathias Hattinger, Martin Pachler, Christoph Zellner; заявитель: FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH. — 12 с.
11. Патент 212861458 U Китайская Народная Республика, МПК В61G 7/04, В25J 11/00. Train unhooking robot system [Роботизированная система расцепки состава]; № 202021983274 .4: заявл. 11.09.2020; опубл. 02.04.2021 / YAO XIN, XIANG JIANG, LI YAN, ZHANG YANZHAO, LI CHAO, WANG RUGUI, YANG TAO, HUANG SHUGUANG, YANG XINHANG, CUI YUHUA, FANG HAITAO, WANG WEIYAO, SHAN NI; заявитель Shanghai Cool Robot Co Ltd. — 8 с.
12. Патент 211617712 U Китайская Народная Республика, МПК В61G 7/04. Unhooking robot system for railway hump operation [Роботизированная система отцепления для эксплуатации железнодорожной горки]; № 201922371071.3: заявл. 26.12.2019;

опубл. 02.10.2020 / ZHANG XIAOQIANG, MA YUKUN, AN DI, HU GAN, LI KEJIA, BAO LUKUN, CHE DEHUI, ZHANG LIANG, ZHANG DEFU, REN JIANZHONG, LI YANG, MA BIN, YU WANG, YANG LIN, ZHAO QINGYU, YANG GUANGWEI; заявитель Shenyang Qihui Robot Application Technology Co Ltd China Academy of Railway Sciences Corp Ltd CARS China Railway Shenyang Group Co Ltd Transportation and Economics Research Institute of CARS. — 16 с.

13. Патент 114802335 A Китайская Народная Республика, МПК В61G 7/04, В61Н 13/00, В61D 15/00. Pin pulling and air pipe picking robot for train couplers [Робот для вытягивания штифтов и подбора воздушных труб для сцепок поездов]; № 202210300236 .1: заявл. 25.03.2022; опубл. 29.07.2022 / HUANG SHUGUANG,

YANG TAO, WANG RUGUI, YANG XINHANG; заявитель Beijing Huili Intelligent Technology Co Ltd. — 10 с.

14. Патент 10471976 В2 Соединенные Штаты Америки, МПК В61G 7/04, В25J 5/00, G05D 1/02. Railway maintenance device [Устройство для обслуживания железных дорог]; № 15 / 201,336: заявл. 01.07.2016; опубл. 12.11.2019 / Zahid F. Mian; заявитель International Electronic Machines Corp. — 27 с.
15. Патент № 2450946 С1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04. Система авторасцепки вагонов на сортировочной горке: № 2010151130/11: заявл. 14.12.2010: опубл. 20.05.2012 / В. Б. Свердлов, С. Г. Акмалов, Г. Ю. Иргер; заявитель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». — 12 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 1, pp. 16–29
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-16-29

Simulation Modeling of the Robotic System Operations Designed for Parallel Train Break-Up on Automated Humps

Information about authors

Kudyukin V. V., Deputy General Director. E-mail: v.kudyukin@vniias.ru

Vukolov A. V., Head of the Scientific and Technical Complex of Intelligent Control and Management Systems. E-mail: a.vukolov@vniias.ru

Kuz'min V. S., PhD in Engineering, Leading Specialist of the Department of Technological Support and Robotics of the Center for Robotization of Technological Processes of the Scientific and Technical Complex of Intelligent Monitoring and Control Systems. E-mail: vs.kuzmin@vniias.ru

JSC Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport (JSC NIIAS), Moscow

Abstract: Within the framework of the Digital Railway Terminal Concept, it is expected to create robotic complexes that provide automatic train break-up and wagon uncoupling at a sorting hump. This article deals with the issue of selecting technical and operational characteristics and algorithm for a mobile platform moving part of such a robotic complex. The article describes the developed mathematical model that takes into account various options of the mobile platform movements. Using the developed model, various designs of the robotic complex mobile platform have been compared including those by a number of consecutively formed wagon cuts. The simulation has shown that a greater number of consecutively formed wagon cuts can be achieved by increasing the speed and acceleration of the mobile platform carriage, as well as by using a more complex algorithm for the mobile platform carriage. This requires the use of an additional fixed track sensor designed for measuring the distance between the current carriage ordinates and automated couplers to be uncoupled.

Keywords: marshaling yard; hump; robotic complex; train break-up from hump; technical and operational characteristics.

References

1. Dudorov E. A., Kotova K. A., Kudyukin V. V., Zhidenko I. G. Robototexnicheskie komplekсы dlya obsluzhivaniya podvizhnogo sostava [Robotic systems for servicing rolling stock]. *Vestnik Instituta problem estestvenny`x monopolij: Tekhnika zheleznny`x*

dorog [Bulletin of the Institute for Problems of Natural Monopolies: Railway Engineering], 2022, l. 1(57), pp. 50–55. (In Russian)

2. Kudyukin V. V., Dudorov E. A., Vukolov A. V., Kotova K. A. Robotizaciya kak e`lement cifrovoy transformacii [Robotization as an element of digital transformation]. *Zheleznodorozhny`j transport* [Railway transport], 2022, l. 5, pp. 19–23. (In Russian)
3. Dudorov E. A., Kotova K. A. Sistema upravleniya manipulyatorom robototexnicheskogo kompleksa dlya obsluzhivaniya mexanizmov scepki i tormoznoj sistemy` zheleznodorozhny`x vagonov [Manipulator control system for a robotic complex for servicing coupling mechanisms and braking systems of railway cars]. *Aktual`ny`e problemy` sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current problems of modern science, technology and education], 2021, vol. 12, l. 1, pp. 58–64. (In Russian)
4. Suyunbaev Sh. M. Ustrojstvo po avtomaticheskoj rascepkе vagonov pri rasformirovanii sostavov na sortirovochnoj gorke [Device for automatic uncoupling of cars when disbanding trains at a sorting hump]. *Proceedings of Conference «Zheleznodorozhny`j podvizhnoj sostav: problemy`, resheniya, perspektivy`»* [Railway rolling stock: problems, solutions, prospects]. Tashkent, April 20–23, 2022, pp. 161–165. (In Russian)
5. Pat. 2410262 (RU). *Ustrojstvo dlya avtomaticheskogo rascepleniya avtoscepok dvizhushhixsya vagonov* [Pat. 2410262 (RU). Device to automatically disconnect running car automatic couplers], 2011.
6. Pat. 208417 (RU). *Promy`shlenny`j robot dlya avtomaticheskogo rascepleniya dvizhushhixsya gruzovy`x vagonov* [Pat. 208417 (RU). Industrial robot for automatic uncoupling of moving freight wagons], 2021.
7. Pat. 2700208 (RU). *Ustrojstvo dlya avtomaticheskogo rascepleniya vagonov dvizhushhixsya poezdov* [Pat. 2700208 (RU). Device for automatic disengagement of cars of moving trains], 2019.
8. Pat. 2728968 (RU). *Sposob avtomaticheskogo rascepleniya avtoscepok dvizhushhixsya vagonov i ustrojstvo ego osushhestvleniya* [Pat. 2728968 (RU). Method for automatic disengagement of automatic couplings of moving cars and device for its implementation], 2020.
9. Pat. 216043 (RU). *Ustrojstvo avtomaticheskogo rascepleniya vagonov* [Pat. 216043 (RU). Device for automatic uncoupling of wagons], 2023.
10. Pat. 3095666 (EP). *Vorrichtung zum entkuppeln einer langgemachten schraubenkupplung*, 2016.
11. Pat. 212861458 (CN). *Train unhooking robot system*, 2021.
12. Pat. 211617712 (CN). *Unhooking robot system for railway hump operation*, 2020.
13. Pat. 114802335 (CN). *Pin pulling and air pipe picking robot for train couplers*, 2022.
14. Pat. 10471976 (US). *Railway maintenance device*, 2016.
15. Pat. 2450946 (RU). *Sistema avtorasceпки vagonov na sortirovochnoj gorke* [Pat. 2450946 (RU). Automatic system to uncouple cars on hump yard], 2012.