

ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЯХ

Негрей В.Я., Пожидаев С.А.

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

Аннотация. Приводится методика оценки параметров автоматизированных систем закрепления и удержания подвижного состава в парках станций на основе логико-вероятностных методов. Для обеспечения безопасности перевозочного процесса определяется требуемое удерживающее усилие с учетом рисков и вероятностного характера различных факторов, фактических условий нахождения подвижного состава на станционных путях.

Ключевые слова: безопасность технологических процессов, железнодорожная станция, удерживающее устройство, логико-вероятностная модель, механизированные средства закрепления подвижного состава, продольный профиль путей.

LOGICAL-PROBABILISTIC MODELS FOR CALCULATING SAFETY SYSTEMS AT RAILWAY STATIONS

Negrey V.Ya., Pozhidaev S.A.

Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

Abstract. A methodology for estimating the parameters of automated systems for securing and retaining rolling stock in station fleets based on logical-probabilistic methods is presented. To ensure the safety of the transportation process, the required holding force is determined taking into account the risks and the probabilistic nature of various factors, the actual conditions of the rolling stock on the station tracks.

Keywords: safety of technological processes, railway station, holding device, logical-probabilistic model, mechanized means of securing rolling stock, longitudinal profile of tracks.

Повышение уровня безопасности функционирования железнодорожных станций требует создания современных систем автоматизированного закрепления и удержания подвижного состава в парках железнодорожных станций [1]. Особую остроту эта задача имеет для парков станций, расположенных на уклонах 1–2 ‰. Такое обстоятельство связано с существенным изменением физико-технических параметров подвижного состава и сокращением основного удельного сопротивления движению вагонов, практически неизменными на протяжении длительного времени нормативными требованиями к параметрам продольного профиля путей парков железнодорожных станций, их содержанию [2–3].

Существенное влияние на условия закрепления и удержания подвижного состава оказывают следующие технические факторы [4]:

- износ головки рельса;
- дефекты путевого развития и подвижного состава в месте движения юзом вагона при их торможении башмаками (накат, уступ, расплющивание, выработка рельсов, отклонение геометрии участка пути от проектных норм, дефекты поверхности катания колеса и др.);
- неустойчивые трибологические характеристики системы «колесо-рельс» или наличие масляных загрязнений. При наличии масляных загрязнений тормозной эффект от, например, башмаков может снизиться в 1,5 раза;

– вероятностный характер силы давления колеса на рельс, вызванный неравномерностью размещения груза в вагоне, неровности головки рельса, деформации верхнего строения пути, разного уровня головок рельсов и другими причинами;

– дефекты тормозных башмаков, которые практически повсеместно используются для закрепления подвижного состава. Известно, что новые башмаки могут иметь худшие тормозные качества по сравнению с эксплуатируемыми;

Для повышения уровня безопасности закрепления и удержания вагонов на путях железнодорожных станций используются разнообразные механические устройства, также разработан ряд новых, основанных на различных принципах действия [4]. К ним относятся:

– упор тормозной стационарный УТС–380, как одно из наиболее распространенных в настоящее время устройств, и его модификации («УТС(1)-380», «УТСП-380», «УТС-1-160»);

– устройства закрепления составов типа «УЗС-280», «УЗС-86Р (РК)» системы Н.И. Пачеса и фрикционно-рельсовое устройство нажимного действия «АСУ-ЗР-65»;

– балочные заграждающие устройства «БЗУ-ДУ», «БЗУ-ДУ-СП2К», «БЗУ-ДУ-СП1К»;

– закрепляющее устройство балочное рычажное «ЗУБР», клещевидно-весовое балочное удерживающее устройство «УВУ»;

– домкратовидные устройства закрепления («стопперы»), представляющие собой адаптированные точечные вагонные замедлители (ТВЗ) и другие.

Применение в современных условиях для повышения безопасности технологических процессов инновационных технических средств закрепления и удержания подвижного состава на парковых путях станций позволит добиться ряд важных эффектов, что связано, однако, с определенными дополнительными капитальными вложениями в модернизацию технического оснащения железнодорожных станций, закупкой и установкой необходимого оборудования (таблица 1).

Таблица 1 – Основные факторы по обоснованию внедрения устройств и систем закрепления вагонов

Эффекты	Сдерживающие факторы
1 Повышение безопасности движения, особенно на тех станциях, где приведение параметров продольного профиля парковых путей к нормативному вогнутому очертанию не представляется возможным или вызывает значительные капитальные вложения	1 Дополнительные капитальные вложения в проектирование и монтаж систем автоматизированного закрепления подвижного состава. Увеличение эксплуатационных расходов на содержание устройств и систем, увеличение штата электромехаников
2 Сокращение простоя подвижного состава, значительное ускорение выполнения технологических операций, увеличение пропускной способности станций, уменьшение потребности в путевом развитии парков станций, локомотивах и вагонах	2 В отдельных случаях необходимость точного позиционирования для закрепления составов, воздействия на определенный вагон в составе, например, тяжелогруженный
3 Вывод работников, непосредственно связанных с движением поездов, из травмоопасной зоны, существенное снижение напряженности их труда. Увеличение производительности труда	3 Временный вывод части путевого развития парков станций из эксплуатации при выполнении строительно-монтажных работ по установке оборудования, прокладке электрических кабелей
4 Уменьшение издержек железной дороги, связанных с нарушениями безопасности перевозочного процесса (восстановление путей и стрелочных переводов в случае схода вагонов и «взреза» стрелок, ремонт подвижного состава, нарушение сроков доставки, несохранность перевозки грузов и др.), а также с тяжкими последствиями	4 Усложнение технических устройств и средств оперативного управления работой станций. Недостаточное доверие руководителей и оперативного персонала станций к функциональным возможностям систем по обеспечению безопасности движения в сложных условиях (риски сбоев в работе)
5 Повышение энергоэффективности работы железнодорожных станций, уменьшение вредных воздействий на окружающую среду	5 Возможное сокращение полезной длины путей, что связано с электрической изоляцией рельсовых цепей управления устройствами

К новым и перспективным устройствам закрепления подвижного состава на станционных путях относятся, в частности, «ЗУБР» и «УВУ», разработанные Межгосударственным концерном «Трансмаш». Эти устройства в настоящее время проходят апробирование на станциях Белорусской железной дороги и Холдинга «РЖД».

Удерживающее весовое устройство «УВУ» разработано Молодечненским электромеханическим заводом (Молодечно, РБ). Сравнительные характеристики этих устройств приведены в таблице 2.

Конструктивная особенность устройства ЗУБР заключается в возможности увеличения усилия нажатия тормозных шин на обод колес вагонов, находящихся в сцепке в составе поездов на приемо-отправочных путях станций. Благодаря этому, уменьшается риск выдавливания порожних и легковесных вагонов при их закреплении с повышенным усилием нажатия до 120 кН и усилием удержания 50–60 кН. Устройство «ЗУБР» разработано на базе современного заграждающего устройства для сортировочных путей типа «БЗУ-ДУ-СП2К». Также имеет систему дистанционного управления и контроля положения.

Таблица 2 – Сравнительные технико-эксплуатационные характеристики закрепляющих устройств

Характеристика	Тип устройства для закрепления:			
	«УЗС-280»	«УЗС-86Р»	«ЗУБР»	«УВУ»
Погашаемая энергетическая высота для вагона массой 80 т на 1 м длины по тормозным шинам (на вагон), м эн. в., не менее	0,16 (1,5)**	Нет данных	0,02 (0,35)**	0,02 (0,5)**
Усилие нажатия тормозных шин, кН (тс), не более	–	–	120 (12)	150 (15)
Усилие удержания, приходящееся на одну тележку вагона, кН (тс)	250 (25)	400 (40)	50–60 (5–6)	70–80 (7–8)*
Масса состава, удерживаемого устройством на уклоне 0,005, кН (т)	71000 (7100)	114000 (11400)	14000 (1400)	20000 (2000)
Продолжительность срабатывания, с	до 40	20-24	45	60-90
Габаритные размеры, мм				
длина по тормозным шинам	4860	Нет данных	8000	12000
ширина	2260	Нет данных	4000	3000
высота	–	–	500	600
Возвышение над УГР в рабочем и нерабочем положениях, мм	–	–	100 / 65	65
Скорость входа вагонов в заторможенное устройство, км/ч (м/с), не более	0	0	16,2 (4,5)	5 (1,4)
Средний расчетный коэффициент торможения $\mu = F_{уд} / F_n (Q_{ср})$	–	–	0,5	0,54
* Средневзвешенное значение $F_{уд} = 76,3$ кН (7,63 тс) на одну ось вагона, полученное по результатам испытаний. ** Ориентировочно.				

Отличительной особенностью весового удерживающего устройства УВУ является то, что создаваемое усилие нажатия тормозных рельсов эквивалентно нагрузке от колеса на ходовой рельс, что позволяет предотвратить «выдавливание» колес вагонов из устройства при закреплении и обеспечить большее усилие удержания. Максимальное усилие нажатия ограничено величиной 150 кН (15 тс). Через устройство можно пропускать поездные и маневровые локомотивы, т.к. возвышение над уровнем головки рельса составляет не более 65 мм. В настоящее время ведется разработка дистанционной системы управления новым устройством. По результатам испытаний, выполненных в 2021 г. с целью апробации опытного устройства «УВУ» МЭМЗ для эксплуатации на приемо-отправочных путях железнодорожных станций Белорусской железной дороги, получены промежуточные и основные расчетные характеристики, эмпирическая зависимость усилия удержания устройством от массы отцепы вагонов (рисунок 1).

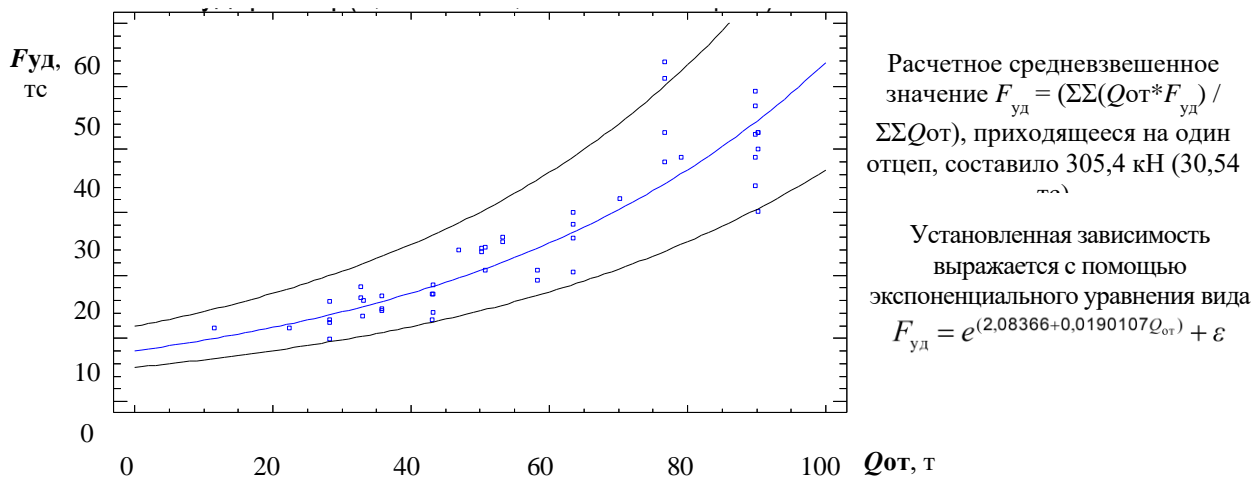


Рис. 1 – Экспоненциальная зависимость удерживающего усилия $F_{уд}$ от массы тормозного отцепа $Q_{от}$

Статистические параметры эмпирической зависимости приведены в таблице 3 и показывают хорошее качество приближения эмпирических данных. Так, при $Q_{от} = 60$ т, $F_{уд} = 62,8$ кН в пределах [43,5; 90,8] (6,28 тс в пределах [4,35; 9,08]) на одну ось вагона.

Таблица 3 – Параметры аппроксимации эмпирических данных зависимостью $F_{уд} = f_{эмп}(Q_{от})$

Вид зависимости	Статистические параметры качества:				
	коэффициент корреляции r^*	t -статистика	коэффициент детерминации R^2	F -статистика	DW -статистика
Экспоненциальная	0,92	16,16	0,86	261,16	2,12

*Для линейной зависимости коэффициент корреляции $r = 0,90$.

По заявленным техническим характеристикам весового удерживающего устройства «УВУ» усилие нажатия тормозных рельсов на колеса 2-ухосной тележки под нагрузкой 60 т составляет не более 150 кН (15 тс) во избежание выдавливания вагона из устройства. В этом случае с учетом величины коэффициента торможения $\mu = 0,54$ (таблица 2) усилие удержания составит $F_{уд} = 150 \cdot 0,54 = 81$ кН (8,1 тс \approx 8 тс), что практически соответствует данным таблицы 2. Полученное значение определяет в дальнейших расчетах функциональные возможности использования устройства при различных условиях эксплуатации.

Целесообразность применения механических устройств и автоматизированных систем закрепления подвижного состава устанавливается на основе решения технико-экономической задачи, принципиальная постановка которой приведена на рисунке 2.

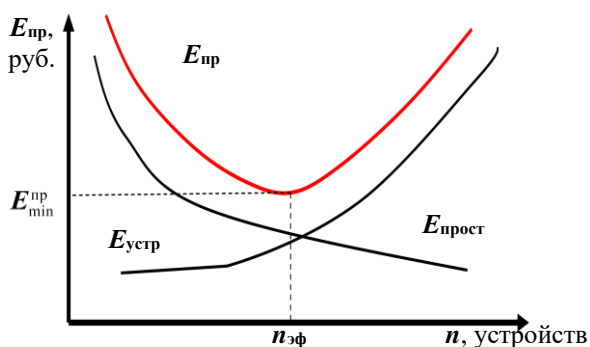


Рис. 2 – Принципиальная схема технико-экономического обоснования внедрения систем и устройств автоматизированного закрепления подвижного состава в парках и на путях железнодорожных станций

С увеличением количества устройств закрепления, устанавливаемых на станционных путях, возрастают приведенные затраты, связанные с проектированием и монтажом устройств, а также с содержанием новых устройств в процессе эксплуатации $E_{устр}$, но в тоже время возникает эффект в сокращении простоя подвижного состава на станции (вагоно-часы, локомотиво-часы) и задержек поездов (поездо-часы), а следовательно и эксплуатационных расходов $E_{прост}$. При больших размерах движения поездов, для станционных путей на уклонах этот эффект будет проявляться значительней, а при малых размерах движения – в меньшей степени, или даже отсутствовать. Возможен также и комбинированный вариант – с использованием как

даже отсутствовать. Возможен также и комбинированный вариант – с использованием как

существующей, так и прогрессивной технологии закрепления подвижного состава на станции. Таким образом, функция суммарных приведенных затрат $E_{пр} = f(E_{устр}; E_{прост})$ имеет минимум $E_{мин}^{пр}$, при котором применение устройств механизированного закрепления подвижного состава становится эффективным ($n_{эф}$).

Для определения объемов капитальных вложений в закупку и выполнение строительно-монтажных работ по установке удерживающих устройств на путях парковых станций необходимо надежно определять удерживающее усилие в фактических условиях нахождения подвижного состава с учетом действия различных факторов и парирования возможных рисков нарушения условий безопасности перевозочного процесса.

Удерживающее усилие $F_{уд}$ должно быть не менее величины и противоположно по направлению движущей силы $F_{дв}$, создающейся силой тяжести состава $F_T = Q_{бр}g$ с учетом тангенциальной поправки, находящегося на уклоне $i_{спр}$ при противодействии сил сопротивления движению $F_{сопр} = wQ_{бр}g$. В этом случае удерживающее усилие $F_{уд} \geq F_{дв} - F_{сопр}$, кН. На основе полученного вывода

$$\bar{F}_{уд} \geq Q_{бр}g \left(i_{спр} - \bar{w} \left[\cos(\arctg i_{спр}) (1 + i_{спр}^2) \right] \right) 10^{-3},$$

или с достаточной точностью $\bar{F}_{уд} \geq Q_{бр}g (i_{спр} - \bar{w}) 10^{-3}$,

где \bar{w} – суммарное сопротивление движению состава на пути, Н/кН;

$$\bar{w} = \bar{w}_{тр} + \bar{w}_o + \bar{w}_{кр} \pm \bar{w}_{св} + w_{си};$$

где $\bar{w}_{тр}, \bar{w}_o, \bar{w}_{кр}, \bar{w}_{св}, w_{си}$ – соответственно, удельные сопротивления движению при трогании с места, основное удельное сопротивление, от кривых участков пути и снега и инея. Расчетные выражения для определения этих сопротивлений приведены в таблице 5.

В самых неблагоприятных условиях для удержания состава на парковых путях станций, когда попутный ветер создает дополнительную движущую силу, способствующую сдвигу вагонов с места во время стоянки и их движению, сопротивление $\bar{w}_{св} < 0$ и $w_{си} = 0$, выражение для определения удерживающего усилия примет вид

$$\bar{F}_{уд} \geq Q_{бр}g \left((i_{спр} + \bar{w}_{св}) - \bar{w} \right) 10^{-3}, \text{ где } \bar{w} = \bar{w}_{тр} + \bar{w}_o + \bar{w}_{кр}.$$

С учетом вероятностного характера сил сопротивления движению

$$F_{уд} \geq \bar{F}_{уд} + t_{\beta} \sigma_w \text{ или } F_{уд} \geq Q_{бр}g \left((i_{спр} + \bar{w}_{св}) - \bar{w} + t_{\beta} \sigma_w \right) 10^{-3},$$

где t_{β} – параметр доверительной вероятности;

σ_w – среднеквадратическое отклонение суммарного сопротивления движению состава относительно величины \bar{w} :

$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_{w_o}^2 + \sigma_{w_{тр}}^2 + \sigma_{w_{кр}}^2 + \sigma_{w_{св}}^2} \text{ при } \sigma_{w_j} = \gamma_j \bar{w}_j,$$

где $\sigma_{w_o}, \sigma_{w_{тр}}, \sigma_{w_{кр}}, \sigma_{w_{св}}$ – среднеквадратическое отклонение, соответственно, основного удельного сопротивления, сопротивления при трогании вагонов с места, от кривых участков пути и от среды и ветра, Н/кН;

γ_j – коэффициент вариации величины удельных сил сопротивления движению вагонов. Принимается $\gamma_{осн} = \gamma_{кр} = 0,1$; $\gamma_{тр} = 0,15$; $\gamma_{св} = 0,3$.

Для удержания состава с риском самопроизвольного ухода вагонов, близким к нулю (уровень доверительной вероятности $p = 0,997$)

$$F_{уд} \geq Q_{бр}g \left((i_{спр} + \bar{w}_{св}) - \bar{w} + 3\sigma_w \right) 10^{-3},$$

а при уровне риска, равном 0,05 (уровень доверительной вероятности $p = 0,95$)

$$F_{уд} \geq Q_{бр}g \left((i_{спр} + \bar{w}_{св}) - \bar{w} + 1,65\sigma_w \right) 10^{-3}.$$

Количество устройств для закрепления и удержания состава на парковых путях определяется как

$$K_3 \geq \frac{Q_{бр}g \left((i_{спр} + \bar{w}_{св}) - \bar{w} + t_{\beta} \sigma_w \right) \cdot 10^{-3}}{F_{уд}^{устр} - t_{\beta} \sigma_{уд}},$$

где $\sigma_{уд}$ – среднее квадратическое отклонение усилия удержания устройства относительно его номинальной величины $F_{уд}^{устр}$ (таблица 2), Н (тс).

В соответствии с приведенными выражениями выполнены проверочные расчеты по определению удерживающего усилия для условий станций Апатиты и Чита-1 Холдинга «РЖД». Исходные данные приведены в таблице 4, а результаты расчета – в таблице 5.

Таблица 4 – Исходные данные для расчета потребного удерживающего усилия

Наименование железнодорожной станции	Исходные данные
1 Апатиты	Полезная длина пути – 1840 м; спрямленный уклон – 0,62 ‰; масса брутто состава – 10000 т; количество вагонов в составе – до 131 ; груз – фосфатное сырьё; средняя температура в летний период (в долинах/плато) – 12,9° / 7,7° ; максимальная температура 31° / 26° ; средняя скорость ветра – 3,3 м/с / более 6 м/с (порывы до 15 м/с) под углом 30°
2 Чита-1	Полезная длина пути – 1250 (3000) м; масса брутто состава – 7100 т; количество вагонов в составе – 100 / 74 ; спрямленный уклон – 2 ‰; груз – уголь, руда; средняя температура в летний период 21° ; максимальная температура 38° / 33° ; средняя скорость ветра: 7–10 м/с (порывы до 22 м/с) под углом 30° ; на путях имеются кривые участки путей радиусом $R = 1200$ м

Таблица 5 – Результаты расчета потребного количества удерживающих устройств в реальных условиях

Параметр расчета	Расчетное выражение	Величина параметра для условий станций:	
		Апатиты	Чита-1
1	2	3	4
1 Основное удельное сопротивление, Н/кН	приближенная оценка $\hat{w}_0 = 5,39231 - 1,05635 \ln q_{бр}$	0,5	0,5; по оценке 0,57 при $q_{бр} = 95,95$ т
2 Удельное сопротивление при трогании состава с места, Н/кН	$\bar{w}_{тр} = \frac{275}{P_0 + 70}$	1,02 при $P_0 = 200$ кН	0,86 при $P_0 = 250$ кН 0,89 при $P_0 = 240$ кН
3 Дополнительная движущая сила от ветровой нагрузки, Н/кН	$\bar{w}_{св} = 17,8 \left(C_{x_i} S_{i1} + \sum_{j=2}^n C_{x_j} S_{j1} \right) v_p^2 / (273 + t_p) \sum_{j=1}^n q_j$	1,33	2,99 при $v_b = 22$ м/с; 0,46 при $v_b = 10$ м/с
4 Удельное сопротивление от кривых участков пути, Н/кН	$\bar{w}_{кр} = \frac{700}{R}$	0	0,58
5 Потребное удерживающее усилие без учета среднее квадратическое отклонения, кН (тс)	$\bar{F}_{уд} \geq Q_{бр} g (i_{спр} + \bar{w}_{св}) - \bar{w}$	43,0 (4,3); 131 (13,1) при $i_{спр} = 1,5$ ‰; 231 (23,1) при $i_{спр} = 2,5$ ‰ при скорости ветра 15 м/с	212,44 (21,24), $v_b = 22$ м/с; 29,25 (2,93), $v_b = 10$ м/с
6 Суммарное среднее квадратическое отклонение, Н/кН	$\sigma_w = \sqrt{\sigma_{w_0}^2 + \sigma_{w_{тр}}^2 + \sigma_{w_{кр}}^2 + \sigma_{w_{св}}^2}$	0,43	0,21 при $v_b = 10$ м/с
7 Потребное удерживающее усилие с учетом среднее квадратическое отклонения, кН (тс)	$F_{уд} \geq Q_{бр} g (i_{спр} + \bar{w}_{св}) - \bar{w} + t_\beta \sigma_w$	168,73 (16,9) при $t_\beta = 3$; 111,78 (11,2) при $t_\beta = 1,65$	73,13 (7,3) при $t_\beta = 3$; 53,34 (5,3) при $t_\beta = 1,65$ (для средней скорости ветра 10 м/с)
8 Потребное количество устройств «ЗУБР» $F_{уд}^{устр} = 60$ кН	$K_3 \geq \frac{Q_{бр} g (i_{спр} + \bar{w}_{св}) - \bar{w} + t_\beta \sigma_w}{F_{уд}^{устр} - t_\beta \sigma_{уд}} \cdot 10^{-3}$	2,81 \approx 3 при $t_\beta = 3$; 1,86 \approx 2 при $t_\beta = 1,65$	1,21 \approx 2 при $t_\beta = 3$; 0,9 \approx 1 при $t_\beta = 1,65$
9 Потребное количество устройств «УВУ» $F_{уд}^{устр} = 76,3$ кН		2,21 \approx 3 при $t_\beta = 3$; 1,47 \approx 2 при $t_\beta = 1,65$	0,96 \approx 1 при $t_\beta = 3$; 0,7 \approx 1 при $t_\beta = 1,65$
10 Потребное количество тормозных башмаков	$K_6 = \frac{n}{200} (1,5 i_{спр} + 1 + K_{доп})$	7 при $i_{спр} = 0,62$ ‰	6–11 при $v_b = 10$ м/с

Таким образом, приведенная методика оценки параметров устройств и автоматизированных систем закрепления и удержания подвижного состава в парках железнодорожных станций на основе логико-вероятностных методов расчета позволяет надежно определять требуемое удерживающее усилие с учетом действия различных факторов и фактических условий нахождения подвижного состава на станционных путях. В соответствии с полученными положениями рассчитывается необходимое количество современных удерживающих устройств, внедряемых в настоящее время в практику эксплуатации железнодорожного транспорта для обеспечения безопасности перевозочного процесса.

Список литературы

1. Негрей, В.Я. Логико-вероятностный метод в оценке безопасности транспортных систем / В.Я. Негрей, С.А. Пожидаев // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы XI Межд. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж.д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. Ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2021. – С. 48–49.
2. Смирнов, В.И. О равновесном уклоне станционного профиля / В.И. Смирнов, С.А. Видюшенков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 575–582.
3. Числов, О.Н. Совершенствование методологических и технико-технологических решений по закреплению перспективных видов подвижного состава на станционных железнодорожных путях / О.Н. Числов, А.М. Ильин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – Новосибирск: СГУПС, 2022. – № 1 (60) – С. 38–48.
4. Негрей, В.Я. Совершенствование подходов к оценке безопасности сортировочных процессов при нахождении подвижного состава в парках сортировочных станций / В.Я. Негрей, С.А. Пожидаев // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы XI Межд. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж.д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. Ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2021. – С. 49–51.