

УДК 656.212.5.073:658.011.56

В. В. БУРЧЕНКОВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСКОРЕНИЙ ГОРОЧНЫХ ТЕПЛОВЗОВ НА РЕАЛИЗАЦИЮ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ РОСПУСКА СОСТАВОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

Повышение перерабатывающей способности сортировочных станций зависит от эффективной реализации переменной скорости надвига и роспуска составов, это обусловлено ускорениями, которые может развивать горочный тепловоз. Применение тепловозов с повышенной секционной мощностью актуализирует формулирование и решение задачи определения влияния ускорения на повышение средней скорости расформирования составов.

Введение. Для управления скоростью надвига и роспуска составов с горки на сортировочных станциях используется система телеуправления горочным локомотивом ТГЛ, являющаяся составной частью комплексной системы автоматического управления сортировочным процессом КСАУ СП. К одному из основных требований, предъявляемых к задаваемым скоростям надвига и роспуска, относится их реализуемость [1]. При вычислении средней скорости роспуска состава между двумя последовательными отрывами отцепов необходим учет ряда факторов, влияющих на расчетное время, которое обеспечивает прохождение первым отцепом участка регулирования определенной длины. К числу указанных факторов следует отнести ускорение (замедление), развиваемое горочным локомотивом во время роспуска состава; недоучет его может привести не только к искажению начальных интервалов скатывания отцепов, но и к повторному сцепу вагонов на вершине горки; и то и другое снижает качество расформирования составов [2, 3].

Постановка задачи. Использование на крупных сортировочных станциях мощных маневрово-вывозных тепловозов ТЭМ7А, оснащенных современной системой телеуправления, (станция Усть-Лужская Октябрьской ж. д., станция Свердловск-Сортировочный Свердловской ж. д. и др.) актуализирует формулировку и решение задачи повышения средней скорости надвига и роспуска составов за счет реализации повышенных ускорений при увеличении и уменьшении заданий по скорости движения [4]. Система автоматического регулирования скорости тепловоза САР СТ, в качестве локомотивной части системы ТГЛ предназначена для решения этой задачи. Она обеспечивает поддержание заданной скорости при изменении сопротивления движению, а также автоматическое управление дизель-генераторной установкой тепловоза и пневматическими тормозами при увеличении или уменьшении скорости надвига и роспуска.

При этом необходимо ответить на вопрос: какие ускорения и замедления должны и могут развивать горочные тепловозы ТЭМ7А и ЧМЭЗ для реализации тех перепадов скоростей, которые задаются устройством управления в процессе роспуска составов с горки.

Основная часть. Определение ускорений (замедлений), которые должен обеспечить тепловоз при реализации заданного изменения скоростей движения смежных отцепов. Примем скорость роспуска в момент отрыва от состава i -го отцепа равной V_i ; $(i + 1)$ -го отцепа –

V_{i+1} . Перепад скоростей роспуска двух смежных отцепов, м/с,

$$v_n = \pm(v_{i+1} - v_i). \quad (1)$$

Временной интервал t_n , в течение которого тепловозом должен быть реализован перепад скоростей v_n , определяется ускорением (замедлением), которое развивает тепловоз, с:

$$t_n = (v_{i+1} - v_i) / a. \quad (2)$$

Временной интервал t_0 между смежными отцепами определяется моментами прохода центров тяжести их через вершину горки [7], с:

$$t_0 = \left(\frac{l_{i+1}}{2} + \frac{l_i}{2} \right) / v_{i+1}, \quad (3)$$

где l_i, l_{i+1} – длины i -го и $i+1$ -го отцепов соответственно.

Очевидно, t_0 должно быть больше или равно t_n . Из условия $t_0 = t_n$ получим выражение для определения ускорения (замедления) a состава при роспуске, которое следует обеспечить тепловозу при переходе от скорости v_i до v_{i+1} для различных длин смежных отцепов, м/с²:

$$a = 2v_{i+1}v_n / (l_{i+1} + l_i). \quad (4)$$

Результаты расчетов по формуле (4) (длина одиночного вагона принята равной 15 м) приведены в таблице 1. В дальнейшем под v_{i+1} будем представлять задаваемую скорость роспуска v .

Таблица 1 – Значения ускорений (замедлений) a , которые должен обеспечить тепловоз для реализации заданного изменения скоростей

$l_i + l_{i+1}$, м	v_{i+1} , м/с	В метрах в секунду		
		0,28	0,55	0,83
28	2,22	0,044	0,087	0,131
	1,67	0,033	0,065	0,099
	1,11	0,022	0,043	0,066
42	2,22	0,029	0,058	0,088
	1,67	0,022	0,043	0,066
	1,11	0,015	0,029	0,044
56	2,22	0,022	0,043	0,066
	1,67	0,016	0,033	0,049
	1,11	0,011	0,022	0,033
70	2,22	0,017	0,035	0,052
	1,67	0,013	0,026	0,039
	1,11	0,009	0,017	0,026
84	2,22	0,019	0,029	0,044
	1,67	0,011	0,022	0,033
	1,11	0,007	0,014	0,022

Из таблицы 1 видно, что наибольшие значения ускорений (замедлений) имеют место для смежных отцепов, являющихся одиночными вагонами, при изменении скоростей свыше 1 км/ч. Это, очевидно, связано с тем, что в данном случае временной интервал t_0 не велик.

Оценка ускорений, реализуемых горочным тепловозом. Значения ускорений, развиваемых локомотивом, ограничиваются как техническими возможностями тепловоза и весом состава, так и параметрами надвигной и спускной части горки, определяющими условия отрыва отцепов от состава.

Уравнение движения подвижного состава при надвиге [7] имеет вид

$$F_k - W_k = \frac{P+Q}{g} a, \quad (5)$$

где F_k – касательная сила тяги локомотива; W_k – сила сопротивления движению; P, Q – вес тепловоза и состава, соответственно; g – ускорение свободного падения; a – ускорение, развиваемое тепловозом.

Из формулы (5) находим величину $a, \text{ м/с}^2$:

$$a = \frac{F_k}{P+Q} g - \frac{W_k}{P+Q} g = g(f_k - \omega_k), \quad (6)$$

где f_k – удельная сила тяги; ω_k – удельное сопротивление движению, Н/кН.

Касательная сила тяги F_k в диапазоне скоростей роспуска для локомотивов ТЭМ2, ЧМЭ3 и ТЭМ7А, применяемых на сортировочных станциях, получена на основе анализа тяговых характеристик этих тепловозов (таблица 2).

Силу сопротивления W_k трудно выразить аналитически, поэтому ее рассчитывают через основное удельное сопротивление движению подвижного состава ω_0 , определяемое по эмпирическим формулам [11].

Таблица 2 – Касательная сила тяги маневровых тепловозов
В килоньютонках

$v, \text{ м/с}$	Локомотив		
	ТЭМ2	ЧМЭ3	ТЭМ7А
0,83	370	365	570
1,11	362	361	560
1,39	360	356	540
1,67	350	352	505
1,94	340	349	460
2,22	300	345	430
2,50	250	342	390
2,78	240	274	355

Основное удельное сопротивление движению поезда

$$\omega_0 = (\omega_0' P + \omega_0'' Q) / (P + Q), \quad (7)$$

Таблица 3 – Ускорения a и замедления a_3 , развиваемые горочными локомотивами типа ЧМЭ3 и ТЭМ 7А, при различных массах составов и скоростях роспуска

$v, \text{ м/с}$	Тип тепловоза	$P+Q, \text{ т}$									
		500		1500		2500		3500		4500	
		a	a_3	a	a_3	a	a_3	a	a_3	a	a_3
0,83	ЧМЭ3	0,647	0,112	0,169	0,0835	0,0744	0,0776	0,0335	0,0751	0,0107	0,0737
	ТЭМ7А	1,049	0,127	0,303	0,0843	0,1540	0,0806	0,0909	0,0772	0,0554	0,0753
1,11	ЧМЭ3	0,639	0,111	0,167	0,0830	0,0728	0,0773	0,0343	0,0749	0,0098	0,0735
	ТЭМ7А	1,029	0,125	0,297	0,0877	0,1510	0,0802	0,0881	0,0769	0,0532	0,0751

где ω_0', ω_0'' – основное удельное сопротивление движению тепловоза и вагонов в составе соответственно, кгс/тс.

Величина ω_0' зависит от скорости движения локомотива V

$$\omega_0' = 1,9 + 0,01V + 0,003V^2. \quad (8)$$

В диапазоне скоростей надвига и роспуска (от 0,83 до 2,78 м/с) ω_0' мало зависит от v и может быть принято постоянной величиной.

Основное удельное сопротивление движению всех вагонов в составе можно определить по формуле

$$\omega_0'' = 1,0 + 0,044v + 0,00024v^2. \quad (9)$$

Учитывая незначительное влияние v в диапазоне от 0,83 до 2,78 м/с на ω_0'' , можно дать численное значение ω_0'' , рассчитанное по формуле (9) и равное 1,46 Н/кН.

Дополнительное сопротивление движению от противоуклона, стрелок и кривых принимается постоянным при длине состава L_n , большей длины противоуклона L_y . При $L_n < L_y$ дополнительное сопротивление определяется длиной состава, находящегося на противоуклоне. Дополнительное удельное сопротивление движению от кривых участков пути определяется для всех видов подвижного состава по следующим формулам:

– для кривых радиусом $R \geq 300 \text{ м}$

$$\omega_r = 700 / R; \quad (10)$$

– для кривых радиусом $R < 300 \text{ м}$

$$\omega_r = 900 / (100 + R). \quad (11)$$

Таким образом, полное удельное сопротивление движению состава при надвиге и роспуске ω_k можно найти из выражения

$$\omega_k = \omega_0 + \omega_{\text{вв}} + \omega_r. \quad (12)$$

Численное значение полного удельного сопротивления, состоящего из основного и дополнительных сопротивлений, определенных по формулам (9)–(12), составит 7,02 Н/кН [6]. Учитывая, что ω_k мало зависит от скорости (в диапазоне от 0,83 до 2,78 м/с) и веса состава, именно это численное значение принято в расчетах развиваемых тепловозом ускорений. При увеличении скорости движения удельная тормозная сила b_T равна нулю, при торможении удельная касательная сила тяги f_k также равна нулю.

Расчет ускорений a при надвиге и роспуске состава в зависимости от веса состава и локомотива и типа локомотива при различных скоростях движения осуществлен по формуле (6), а результаты расчета приведены в таблице 3.

v, м/с	Тип тепловоза	P + Q, т									
		500		1500		2500		3500		4500	
		a	a ₃	a	a ₃	a	a ₃	a	a ₃	a	a ₃
1,39	ЧМЭ3	0,639	0,110	0,164	0,0826	0,0708	0,0771	0,0309	0,0747	0,0088	0,0734
	ТЭМ7А	0,990	0,123	0,284	0,0872	0,0143	0,0798	0,0825	0,0767	0,0489	0,0749
1,67	ЧМЭ3	0,621	0,108	0,161	0,0822	0,0693	0,0768	0,0298	0,0745	0,0079	0,0733
	ТЭМ7А	0,922	0,122	0,216	0,0866	0,1290	0,0795	0,0727	0,0764	0,0412	0,0748
1,94	ЧМЭ3	0,615	0,107	0,159	0,0818	0,0681	0,0766	0,0290	0,0744	0,0073	0,0731
	ТЭМ7А	0,833	0,120	0,232	0,0861	0,1110	0,0792	0,0601	0,0762	0,0314	0,0746
2,22	ЧМЭ3	0,608	0,106	0,156	0,0815	0,0665	0,0764	0,0278	0,0742	0,0064	0,0730
	ТЭМ7	0,774	0,119	0,212	0,0857	0,0999	0,0789	0,0517	0,0760	0,0249	0,0744
2,50	ЧМЭ3	0,602	0,105	0,154	0,0811	0,0654	0,0762	0,0271	0,0741	0,0057	0,0729
	ТЭМ7А	0,696	0,118	0,186	0,0852	0,0842	0,0787	0,0405	0,0759	0,0162	0,0743

Развиваемые замедления движения при торможении состава. При торможении касательная сила тяги $F_k = 0$, поэтому формула (6) приобретает вид

$$a_3 = -g(b_k + \omega_k), \quad (13)$$

где b_k – удельная тормозная сила, т. е. сила, приходящаяся на 1 т состава $P + Q$, Н/кН.

В свою очередь

$$b_t = B_t / (P + Q), \quad (14)$$

где B_t – тормозная сила состава (поезда), кН.

Тормозную силу B_t определяют как произведение суммы действительных сил нажатия тормозных колодок $\sum K$ на действительный коэффициент трения φ_k :

$$B_t = 100 \sum_1^n K \varphi_k, \quad (15)$$

где n – число колес тепловоза.

Коэффициент трения чугунной стандартной колодки о колесо определяется по формуле

$$\varphi_k = 0,6 \frac{16K + 100}{80K + 100} \cdot \frac{V + 100}{5V + 100}, \quad (16)$$

где v – скорость движения, км/ч.

Сила нажатия K чугунных тормозных колодок тепловозов типа ЧМЭ3 и ТЭМ7А составляет 11,0 кН на ось, т. е. 5,5 кН на колесо [8].

Результаты расчетов замедления по формулам (13)–(16) приведены в таблице 3. Из таблицы 3 следует, что достигаемые величины a и a_3 слабо зависят от скорости роспуска, а требуемые значения a и a_3 , напротив, сильно от нее зависят. Для эффективной реализации переменной скорости роспуска по условиям интервального регулирования движения отцепов на спускной части горки тепловоз должен развивать ускорение 0,05–0,08 м/с² (при массовых скоростях роспуска 0,28–2,8 м/с). Максимально возможные ускорения, реализуемые горочным тепловозом, определяются при расформировании составов с начальной массой 5000 т до конечного значения, определяемого массой тепловоза. При этом ускорения рассчитаны для диапазона скоростей, используемых при роспуске составов с горки, 0,83–2,78 м/с с шагом 0,28 м/с. По результатам вычислений построены графики зависимости ускорения (рисунок 1) и замедления движения состава (рисунок 2) от скорости для поездов массой от 500–5000 тонн для тепловозов ТЭМ7А и ЧМЭ3 соответственно.

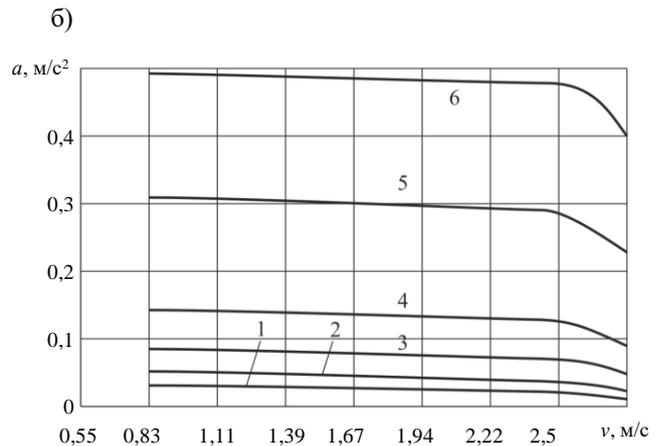
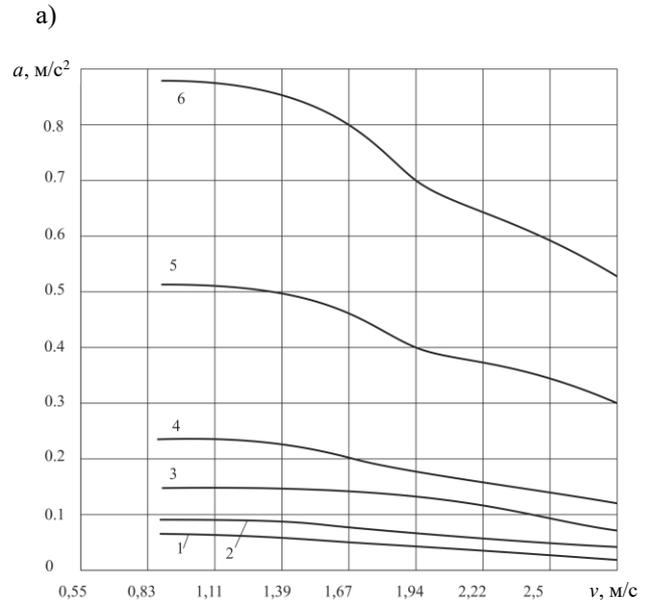


Рисунок 1 – Зависимости ускорений a , реализуемых тепловозами ТЭМ7А (а) и ЧМЭ3 (б), от скорости движения v , при различной массе состава Q : 1 – $Q = 5000$ т; 2 – $Q = 4000$ т; 3 – $Q = 3000$ т; 4 – $Q = 2000$ т; 5 – $Q = 1000$ т; 6 – $Q = 500$ т

Заключение. Наиболее рациональным ускорением для тепловоза ЧМЭ3 следует считать 0,05 м/с², так как ускорение 0,06–0,08 м/с² обеспечивается тепловозом данного типа лишь на предельных эксплуатационных режимах. Тепловоз ЧМЭ3 такое ускорение развивает при массе поезда до 2800 т полностью и до 4000 т частично, а замедление – до 5000 т включительно. Тепловозом ТЭМ7А ускорение 0,05 м/с² обеспечивается при

массе состава до 3800 т полностью и до 5000 частично, а замедление $0,05 \text{ м/с}^2$ тепловоз развивает с массой поезда свыше 5000 т. Из анализа приведенных зависимостей для тепловоза ТЭМ7А следует, что повышение секционной мощности тепловозов позволяет резко увеличить весовые нормы расформируемых составов и обеспечить прирост скорости роспуска на $0,3\text{--}0,5 \text{ м/с}$ при переходе от локомотива ЧМЭЗ к ТЭМ7А. При этом перерабатывающая способность сортировочной горки увеличивается на 290 вагонов в сутки [9].

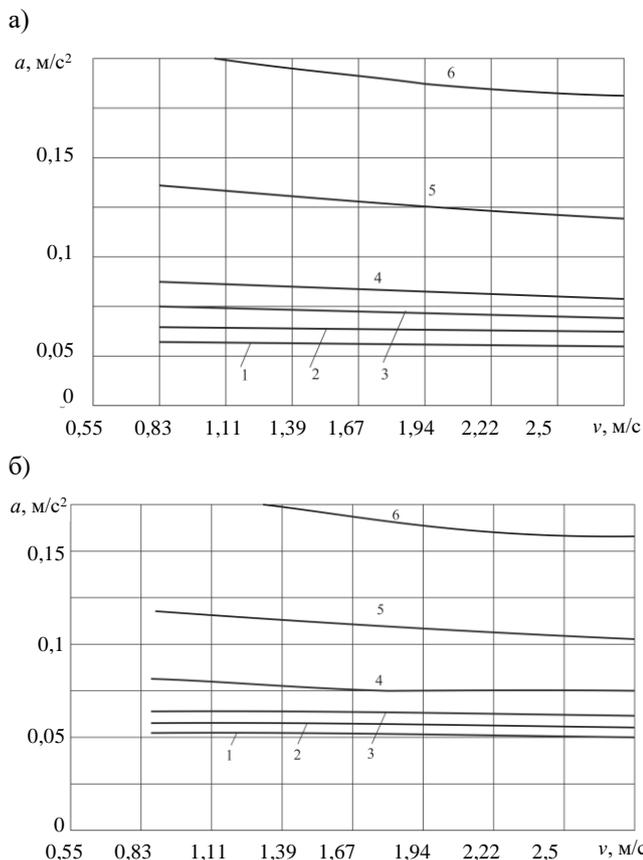


Рисунок 2 – Зависимость замедления a , развиваемого тепловозами ТЭМ7А (а) и ЧМЭЗ (б), от скорости движения v при различной массе состава Q : 1 – $Q = 500 \text{ т}$; 2 – $Q = 2000 \text{ т}$; 3 – $Q = 3000 \text{ т}$; 4 – $Q = 4000 \text{ т}$; 5 – $Q = 5000 \text{ т}$

Требования к показателям качества САР СТ. В обобщенных эксплуатационно-технических требованиях к комплексной системе автоматизации [7] точность поддержания скорости движения состава в диапазоне от $0,5$ до $2,8 \text{ м/с}$ должна быть не менее $0,1 \text{ м/с}$; в диапазоне от $2,8$ до $5,6 \text{ м/с}$ – не менее $0,3 \text{ м/с}$. Быстродействие САР СТ связано с реализацией необходимых ускорений $0,05\text{--}0,08 \text{ м/с}^2$ и параметрическими характеристиками горочных тепловозов.

Получено 03.03.2021

Burchenkov V. V. Assessment of the influence of the acceleration of hump locomotives on the implementation of the variable speed of breaking up trains on marshalling humps.

An increase in the processing capacity of marshalling yards depends on the effective implementation of a variable speed of advancing and breaking up of trains, this is due to the accelerations that a hump locomotive can develop. The use of diesel locomotives with increased sectional power actualizes the formulation and solution of the problem of determining the effect of acceleration on an increase in the average speed of disbandment of trains.

Выводы. Для проверки достаточности тяговых и тормозных возможностей тепловоза при реализации переменной скорости роспуска расформируемого состава составлены аналитические выражения, которые связывают между собой скорость роспуска, перепад скоростей и величины достижимых ускорений и замедлений, определяемых техническими возможностями тепловоза и весом состава, а также силами сопротивлений движению при роспуске.

Повышение секционной мощности тепловозов позволяет существенно увеличить весовые нормы расформируемых составов и обеспечить прирост средней скорости роспуска на $0,3\text{--}0,5 \text{ м/с}$ при переходе от локомотива ЧМЭЗ к ТЭМ7А. Эффективная реализация переменной скорости роспуска повышает перерабатывающую способность сортировочной горки на 290 вагонов в сутки.

Список литературы

- 1 Шабельников, А. Н. Комплексная система автоматизированного управления сортировочными процессами – инновационный проект российских железных дорог : [монография]. – М. : ВИНТИ РАН, 2017. – 242 с.
- 2 Савицкий, А. Г. Инновационный подход к управлению движением на станциях / А. Г. Савицкий, А. В. Шурдак, И. В. Мирошкин // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 3. – С. 24–27; № 4. – С. 36–38; № 5. – С. 25–28.
- 3 Серганов, И. Г. Расчет системы автоматического управления горочным тепловозом / И. Г. Серганов // Вестник ВНИИЖТ. – 1996. – № 8. – С. 45–56.
- 4 Shabelnikov, A. N. Intellectualization of Sorting Processes Control on the Basis of Instrumental Determination of Analogies (Скопус) / A. N. Shabelnikov, N. N. Lyabakh // Proceeding of the Second International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IT'17). – Vol. 1. – 2017. – P. 138–145.
- 5 Burchenkov, V. V. Prospects for the use of digital technologies in marshalling yards / V. V. Burchenkov, A. A. Markavtsov // Транспорт Евразии XXI века : Современные цифровые технологии на рынке транспортных и логистических услуг : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. – Алматы : КазАТК, 2018. – С. 23–24.
- 6 Модин, Н. К. Механизация и автоматизация станционных процессов / Н. К. Модин. – М. : Транспорт, 1985. – 224 с.
- 7 Бурченков, В. В. Определение параметров регулятора скорости горочного тепловоза / В. В. Бурченков // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2019. – № 1 (39). – С. 56–58.
- 8 Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М. : Транспорт, 1985. – 287 с.
- 9 Негрей, В. Я. Перспективы использования цифровых технологий на сортировочных станциях / В. Я. Негрей, В. В. Бурченков // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование : тр. седьмой науч.-техн. конф. (ИСУЖТ-2018). – М. : НИИАС, 2018. – С. 153–154.