Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXV вып. 1, 1973 г.

АНАЛИЗ ТОРМОЗНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РУДНИЧНОГО ПОЕЗДА ПРИ ЭКСТРЕННОМ КОМБИНИРОВАННОМ ТОРМОЖЕНИИ

Р. П. Афанасьев

При необходимости экстренной остановки рудничного поезда одновременно включаются вагонеточные индукторные тормоза и механические тормоза электровоза. Вагонеточные индукторные тормоза [1, 2] выполняют роль гасителей наибольшей начальной скорости, благодаря мгновенному распространению тормозной силы по длине состава. Механические же тормоза электровоза через некоторый промежуток времени t_1, равный времени их срабатывания, вместе с вагонеточными индукторными тормозами, эффективно работающими в интервале скоростей $v_{т\,max} - v_{т\,min}$, обеспечивают полную остановку поезда.

Аналитическое решение тормозной задачи путем интегрирования по скорости при таком комбинированном торможении представляет значительные трудности и в явной форме не решается, так как в дифференциальное уравнение

$$\frac{d v_т}{d t} = -\xi [b_{т.э}\,\eta(t) + b_{т.в}(v_т) + \omega_0(v_т) \pm i], \qquad (1)$$

кроме величин, зависящих от скорости $v_т$, входит временна́я функция $\eta(t)$. Поэтому анализ проводился на основе решения на ЭВМ «Одра-1204» системы дифференциальных уравнений движения заторможенного поезда при различных значениях начальной тормозной скорости $v_{т\,max}$, удельной тормозной силы поезда $b_т = b_{т.э} + b_{т.в}$ и уклона пути i.

При решении тормозной задачи приняты следующие начальные условия.

1. Усредненные скорости движения груженых поездов, согласно характеристикам современных рудничных электровозов, $v_т = 15 \div 20$ *км/ч*.

2. Вес груженого поезда выбран по условиям тяговых возможностей и по нагреву двигателей электровоза.

3. Удельная тормозная сила вагонеточных индукторных тормозов $b_{т.в}$ выбрана по механическим и электромагнитным характеристикам [2].

4. Весь состав поезда оборудован вагонеточными индукторными тормозами (при пневматических колесно-колодочных тормозах на электровозе).

Уравнение (1) привели к виду, удобному для решения на ЭВМ,

$$\frac{d v_т}{d t} = a' \eta(t) + a_1 \sqrt{v_т} \quad c_2 v_т + a_3, \qquad (2)$$

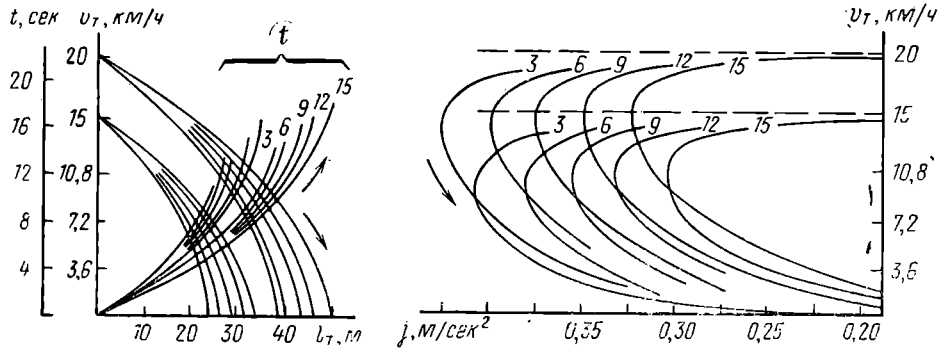
где $a_1 = -\xi A \sqrt{a}$; $a_2 = -\xi e_0$; $a_3 = -\quad (b \pm i)$; b, e_0 — эмпирические числа, входящие в уравнение $\omega_0 = b + e_0 v_т$; $\xi = 1/108$; $a' = -\xi b_{т.э}$; $b_{т.э}$ — удельная тормозная сила электровоза, *кгс/т*; $\eta(t) = 1 - e^{-\gamma t}$; $\gamma = \operatorname{tg} \varphi$; $A = b_{т.в}/\sqrt{v_т a}$; $b_{т.в}$ — удельная тормозная сила состава, оборудованного вагонеточными индукторными тормозами; a — постоянная величина, зависящая от числа пар полюсов p индукторного тормоза и радиуса R колеса вагонетки, $a = p/2\pi R$.

В период неустановившегося торможения при t_1, когда в пневмоцилиндрах электровоза происходит развитие тормозного давления по закону экспоненты, временна́я функция $\eta(t)$ находится в границах $0 < \eta(t) < 1$; в период установившегося торможения t_2, когда тормозное усилие достигает наибольшей величины, $\eta(t) = 1 = \text{const}$. В рассматриваемом случае при механических пневмотормозах электровоза $t_1 = 3$ *сек*.

Коэффициенты a_1, a_2, a_3 и a' при различных значениях $v_{т\,max}$, $b_{т.в}$ и i сведены в таблицу.

Система дифференциальных уравнений (2) была решена на ЭВМ методом Рунге — Кутта [3]. В результате расчета на машине были получены величины четырех параметров: времени торможения t, *сек*; тормозного пути $l_т$, *м*; скорости $v_т$, *м/сек*; замедления j, *м/сек*^{2}.

По результатам их обработки было построено семейство кривых, выражающих взаимозависимость тормозных параметров при экстренном комбинированном торможении тяжеловесных рудничных поездов. На рисунке приведены кривые, соответствующие 3, 6, 9, 12 и 15-й строкам таблицы.



Результаты решения тормозной задачи на ЭВМ.

Анализ результатов решения тормозной задачи начнем с более сложного в тормозном отношении варианта: для $v_{т\,max} = 20$ *км/ч*. Кривые *3* и *6*, выражающие зависимость $l_т = f(v_т)$ соответственно на подъеме пути ($i = +3‰$) и на площадке, показывают, что поезд в результате торможения останавливается в пределах допустимого ПБ тормозного пути $l_т = 40$ *м* в течение времени $t = 13$ *сек*. На правом графике, выражающем зависимость $v_т = f(j)$, кривые имеют наибольшие абсолютные значения замедлений, так как, кроме удельной замедляющей силы $b_т$,

Коэффициенты a_1, a_2, a_3, a'

№ п.п.	Уклон	$v_{т\ max} = 15$ км/ч					$v_{т\ max} = 20$ км/ч				
	i_{00}	$b_{т.в.}$, кгс/Т	a_1	a_2	a_3	a'	$b_{т.в.}$, кгс/Т	a_1			
1	+3	16	—0,074	—0,006	—0,062	—0,157	18	—0,072	—0,006	—0,062	—0,157
2		20	—0,094	—0,006	—0,062	—0,157	23	—0,093	—0,006	—0,062	—0,157
3		23	—0,110	—0,006	—0,062	—0,157	25	—0,100	—0,006	—0,062	—0,157
4	0	16	—0,074	—0,006	—0,034	—0,157	18	—0,072	—0,006	—0,034	—0,157
5		20	—0,094	—0,006	—0,034	—0,157	23	—0,093	—0,006	—0,034	—0,157
6		23	—0,110	—0,006	—0,034	—0,157	25	—0,100	—0,006	—0,034	—0,157
7	—3	16	—0,074	—0,006	—0,007	—0,157	18	—0,072	—0,006	—0,007	—0,157
8		20	—0,094	—0,006	—0,007	—0,157	23	—0,093	—0,006	—0,007	—0,157
9		23	—0,110	—0,006	—0,007	—0,157	25	—0,100	—0,006	—0,007	—0,157
10	—6	16	—0,074	—0,006	+0,021	—0,157	18	—0,072	—0,006	+0,021	—0,157
11		20	—0,094	—0,006	+0,021	—0,157	23	—0,093	—0,006	+0,021	—0,157
12		23	—0,110	—0,006	+0,021	—0,157	25	—0,100	—0,006	+0,021	—0,157
13	—9	16	—0,074	—0,006	+0,049	—0,157	18	—0,072	—0,006	+0,049	—0,157
14		20	—0,094	—0,006	+0,049	—0,157	23	—0,093	—0,006	+0,049	—0,157
15		23	—0,110	—0,006	+0,049	—0,157	25	—0,100	—0,006	+0,049	—0,157

поезд получает дополнительную замедляющую силу от подъема пути, а при торможении на площадке отсутствует ускоряющая сила, обусловленная уклоном пути. Все остальные кривые на левой части графика показывают, что при соответствующих тормозных условиях ($b_т$ и i) тормозной путь превышает нормы ПБ и находится в пределах 43—50 *м* при времени торможения $t=16 \div 18$ *сек*. Что касается замедлений, то их кривые сходятся в начале координат, что указывает на полную остановку поезда (на правом графике начало координат находится за пределами рисунка). На правом графике также видно, что все кривые по истечении времени $t=3$ *сек*, соответствующем времени полного развития давления в тормозных цилиндрах электровоза, изменяют направление и резко выполаживаются.

Рассмотренные графические зависимости показывают, что тормозная задача при соответствующих условиях ($v_т$ и i) и тормозных возможностях ($b_т = b_{т.э} + b_{т.в}$) полностью не решается. Это объясняется тем обстоятельством, что в исходных данных были заложены уклоны рельсового пути [$i=-(6 \div 9)‰$], которые превышают рекомендуемую норму ($i \leqslant -5‰$). Кроме того, по тормозным возможностям поезда верхний предел усредненных скоростей оказался несколько завышенным.

При решении второго варианта, с нижним пределом усредненных скоростей $v_{т\,max}=15$ *км/ч*, исходили из условия, что на производительность откатки в шахтных условиях в бо́льшей степени влияет весовая норма поезда, чем его скорость. Поэтому вес груженого поезда принимался, как и в первом варианте, максимально возможным с учетом тяговых характеристик электровоза. Кривые второго варианта аналогичны кривым первого варианта и отличаются только меньшими значениями тормозных параметров. Так, все кривые на левом графике показывают, что тормозная задача тяжеловесных рудничных поездов при экстренном комбинированном торможении полностью решается. При этом длина тормозного пути $l_т$ находится в пределах 24—35 *м*, а время экстренного торможения до полной остановки поезда $t=11 \div 17$ *сек*. Кривые замедлений, как и в первом варианте, сходятся в начале координат. Тормозная задача в этом случае решается и при завышенных относительно нормы уклонах [$i=-(6 \div 9)‰$]. Следовательно, при рекомендуемых нормах уклона ($i \leqslant -5‰$) можно увеличить скорость движения тяжеловесного поезда до 17—18 *км/ч* при соблюдении правил безопасности по длине тормозного пути.

Обобщая результаты решения тормозной задачи, приходим к выводу, что вагонеточные индукторные тормоза совместно с механическими тормозами электровоза обеспечивают торможение тяжеловесных рудничных поездов. Поэтому можно утверждать, что вагонеточные индукторные тормоза дают возможность увеличить производительность электровозной откатки и повысить безопасность вождения тяжеловесных рудничных поездов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Р П. Методика исследований и испытательный стенд для индукторных тормозов рудничных вагонеток. — В сб.: «Новые исследования в горной электромеханике». Изд. ЛГИ, 1969.

2. Афанасьев Р. П. Исследование характеристик вагонеточных индукторных тормозов. Там же.

3. Мысовских И. П. Лекции по методам вычислений. М., Наука, 1962.