

Д. А. ОСТАПЕЦ (ДИИТ)

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ СКАТЫВАНИЯ ПОРОЖНИХ ВАГОНОВ НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Описано відомі алгоритми роботи систем регулювання швидкості промислового залізничного транспорту, методика розрахунку даних для настройки регуляторів, а також послідовність і порівняльні результати імітаційного моделювання їхньої роботи.

Описаны известные алгоритмы работы систем регулирования скорости промышленного железнодорожного транспорта, методика расчета данных для настройки регуляторов, а также последовательность и сравнительные результаты имитационного моделирования их работы.

The known algorithms of operating the speed regulation systems on industrial railway transport, the method of data calculating for adjustment of the regulators, as well as the consequence and comparable results of imitation modeling of their operation, have been described.

На ряде горных и металлургических предприятий для выгрузки сыпучих грузов из железнодорожных вагонов применяются вагоноопрокидыватели (в/о). Популярным способом уборки разгруженных (порожних) вагонов является способ скатывания последних на пути накопления под действием силы тяжести. На кафедре ЭВМ ДИИТа была разработана и в течение ряда лет модернизировалась автоматизированная система управления скоростью скатывания порожних вагонов от в/о (АУСВ). Структура, описание и основные алгоритмы работы трех первых вариантов данной системы (АУСВ, АУСВ-2, АУСВ-У) приведены в работах [1; 2]. В данный момент ведется разработка очередной серии системы (АУСВ-МК) [3].

В вышеуказанной системе используется дискретный измеритель скорости – датчик скорости ДС-2. Скорость скатывающегося вагона измеряется несколько раз в определенных точках зоны регулирования таким образом, эти точки разделяют всю зону торможения (регулирования) на отдельные участки.

Общая характеристика известных алгоритмов регулирования скорости

В [1] рассматривается принцип регулирования, при котором по разности между измеренной в начале каждого участка скоростью отцепы и заданной скоростью в конце этого участка выбирается путем моделирования степень торможения таким образом, чтобы к концу зоны регулирования разность между фактической и заданной скоростями выхода отцепы из замедлителя была минимальной. При этом закон изменения «мнимой» заданной скорости, с которой желательнее провести отцеп по зоне регулирования, выбран линейным.

В работе [2] предлагается принцип регулирования скорости, при котором закон изменения желаемой скорости представляет собой кривую $V(S)$ движения вагона в замедлителе, включенном на первую ступень торможения, заканчивающуюся в точке V_{Π} (скорость прицеливания). В начале каждого участка по номеру этого участка и по фактической скорости вагона выбирается (для каждой линии ведения) степень торможения замедлителя. Путем последовательного переключения ступеней торможения на последующих участках с высшей на низшую, фактическая линия ведения вагона в замедлителе должна сблизиться с заданной. Тогда на последних участках регулирование скорости будет осуществляться первой ступенью торможения замедлителя, что повысит точность регулирования. Для скорости прицеливания путем цифрового моделирования найдена приближенная эмпирическая зависимость

$$V_{\Pi} = V_3 - 0,3/V_3, \quad (1)$$

где V_3 – заданное значение скорости выхода вагона из замедлителя.

Известен недавно предложенный принцип регулирования скорости, схожий с [2], но при той же общей длине зоны торможения и том же числе датчиков скорости, используется в несколько раз большее число участков торможения (участки более короткие). В данном случае регулятор «отслеживает» наезды на датчики скорости всех осей вагона. Далее, если длина данного участка такова, что при движении по нему вагона, переходные процессы переключения замедлителя на данную ступень торможения не завершатся, то на данном участке управление невозможно и к нему добавляется следующий и т. д. (из нескольких коротких участков образуется один более длинный – рис. 1).

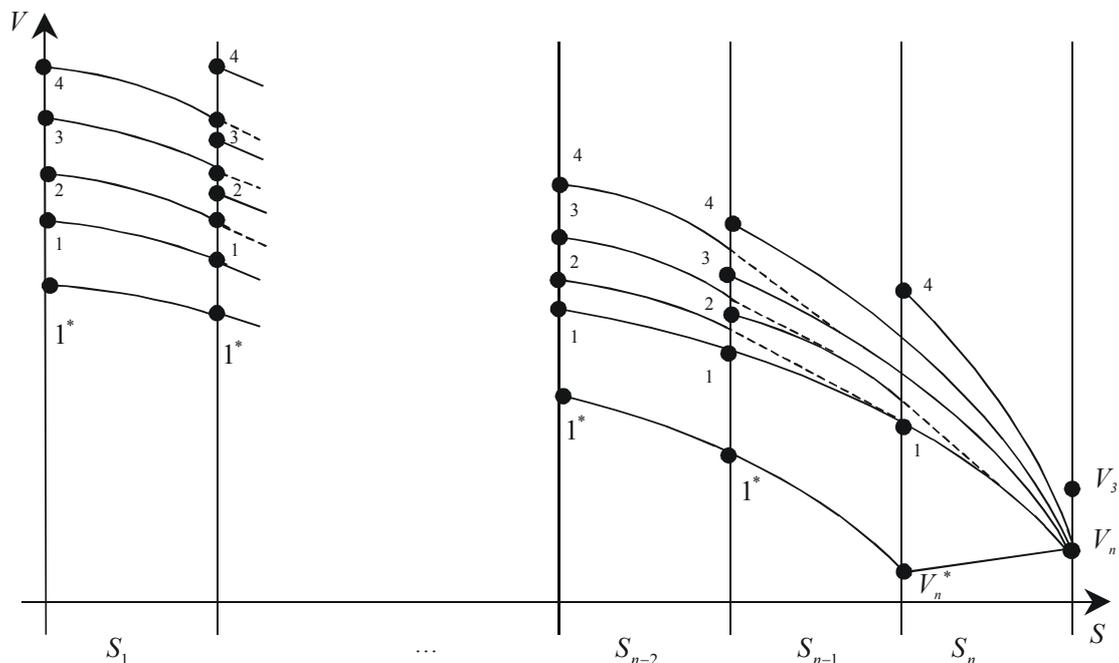


Рис. 1. Возможные траектории движения вагона в замедлителе для различных управляющих воздействий

Также в [2] показано, что принцип регулирования скорости [2] эффективнее принципа регулирования [1]. На основании этого, целесообразно сравнить эффективность (точность) работы системы при регулировании по алгоритму [2] и по алгоритму, приведенному выше.

Методика расчета настройки регулятора

Уровни переключения на участках вычисляются методом близким к методу динамического программирования. Вычисления начинаются с участка, находящегося в конце зоны торможения (n -й участок), по формуле

$$V_{nj} = \sqrt{V_{\Pi}^2 + 2a_{nj}S_n}, \quad j = \overline{1,4}, \quad (2)$$

где V_{Π} – скорость прицеливания (скорость, в которой заканчивается линия ведения); a_{nj} – замедление, создаваемое j -й ступенью торможения на n -м участке; S_n – длина n -го участка.

Для данного алгоритма работы путем моделирования найдена приближенная эмпирическая зависимость V_{Π} от V_3 . Следует отметить, что отличие этих величин друг от друга незначительно (несколько процентов), т. е. точку V_{Π} можно вообще не вводить.

На следующих i -х участках от конца зоны торможения скорости переключения вычисляются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} V_{i,j} &= \sqrt{(V_{i+1,j-1} + \Delta V_{i+1,j-1})^2 + 2a_{ij}S_i}, \\ i &= \overline{1,n-1} \quad j = \overline{2,4} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$V_{i,1} = \sqrt{V_{i+1,1}^2 + 2a_{i1}S_i}, \quad i = \overline{1,n-1}, \quad (4)$$

где $\Delta V_{i+1,j-1}$ – приращение скорости, учитывающее переходной процесс при переключении замедлителя на $(i+1)$ -м участке с j -й на $(j-1)$ -ю ступень.

Фактические линии ведения будут проходить выше расчетных (рис. 1), поэтому $V_{\Pi} < V_3$ и растормаживание замедлителя в процессе управления исключено. Однако реальный процесс торможения недетерминирован, т. е. фактические значения замедлений на участках могут отличаться от расчетных в большую и меньшую сторону. Таким образом, возможно включение 0-й ступени торможения (растормаживание), например, при перетормаживании на предыдущем участке. Такой ситуации желательно избежать, т. к. значительно увеличивается время переходных процессов и расходуются много воздуха из магистрали. Чтобы уменьшить возможность возникновения подобной ситуации, уровни переключения с 0-й ступени на 1-ю выбраны ниже расчетных (см. рис. 1).

Для этого вводится дополнительная линия ведения, заканчивающаяся в точке V_{Π}^* :

$$V_{\Pi}^* = \sqrt{V_{\Pi}^2 - 2\alpha S_n + \Delta V^*}, \quad (5)$$

где α – ускорение свободного скатывания; ΔV^* – изменение скорости за время переходного процесса.

Для вычисления замедления используются следующие формулы:

$$a_{ij} = g' \cdot W_{Tij} \cdot 10^{-3} - \alpha; \quad (6)$$

$$\alpha = g'(i - W_{\Sigma})10^{-3}, \quad (7)$$

где g' – ускорение свободного падения с учетом инерции вращающихся масс; W_{Tij} – удельное сопротивление движению на i -м участке, создаваемое замедлителем, включенным на j -ю ступень; W_{Σ} – суммарное удельное сопротивление движению (основное и от среды и ветра); i – уклон, на котором находится замедлитель.

В системе АУСВ для регулирования скорости скатывания вагонов используется одна

тормозная позиция (только прицельное торможение), состоящая из трех замедлителей нажимного типа (РНЗ).

Известно [3], что замедлитель РНЗ в силу своих конструктивных особенностей имеет стабильную (постоянную для отдельного вагона) тормозную характеристику, т. е. удельное тормозное усилие на вагон не зависит от числа одновременно тормозимых осей.

Однако с учетом того, что в данной системе используется тормозная позиция (ТП), состоящая из трех замедлителей данного типа, удельное тормозное усилие на вагон, тормозимый такой тормозной позицией, будет зависеть от числа осей вагона, одновременно находящихся в замедлителях (рис. 2).

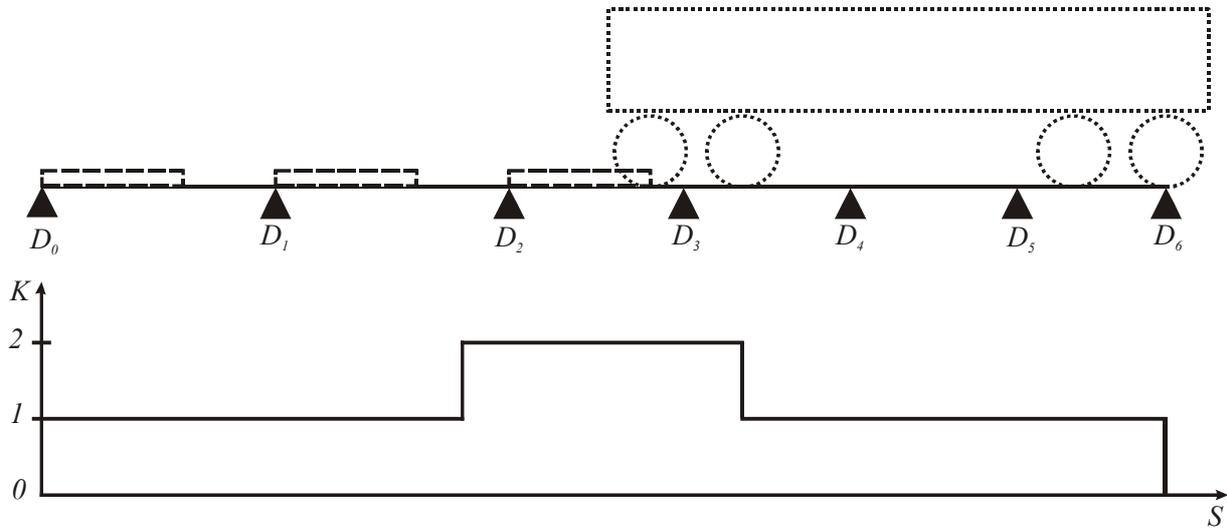


Рис. 2. Расположение датчиков на тормозной позиции и её тормозная характеристика

Тогда

$$W_{Tij} = K_i \cdot W_{Tj}^{PH3}, \quad (8)$$

где W_{Tj}^{PH3} – удельное сопротивление движению, создаваемое одним замедлителем, включенным на j -ю ступень; K_i – коэффициент тормозной характеристики на i -м участке (см. рис. 2).

Значение удельной тормозной силы W_T^{PH3} можно определить через реализованную одним замедлителем мощность (или выполненную работу) при торможении одного вагона (H_T^{PH3})

$$W_{Tj}^{PH3} = \frac{H_{Tj}^{PH3}}{2(l_p + b_m)}, \quad (9)$$

где l_p – рабочая длина замедлителя; b_m – база тележки тормозимого вагона.

Величина H_T^{PH3} известна из справочной литературы, например [4].

Методика моделирования

Исследование динамики работы системы при различных алгоритмах управления было выполнено на разработанной автором имитационной модели.

В разработанной имитационной модели используется событийный принцип моделирования – процесс торможения вагона представляется как процесс, состоящий из отдельных событий (вход на очередной участок управления). Очевидно, по сравнению с временным принципом моделирования, данный позволит повысить точность результатов и сократить количество выполняемых вычислений.

Как указывалось выше, в алгоритме [2] длины участков, по возможности, выбираются такими, что за время движения по ним вагона, переходные процессы в замедлителях успевают завершиться. При этом последние участки короче первых, т. е. остается возможность выхода вагона из последних участков при неоконченном переходном процессе.

При моделировании работы системы по предложенному алгоритму, после входа на управляемый участок, рассчитывается (определяется) номер следующего управляемого участка (участка до входа на который, переходные процессы замедлителей закончатся). Очередным событием и будет вход на данный участок.

Динамические параметры замедлителя РНЗ (времена запаздывания, установки ступеней торможения и постоянные времени) взяты из [4]. Также согласно [4] процесс нарастания и спада давления в цилиндрах (изменение давления во времени) аппроксимирован экспонентами.

Моделирование производилось при следующих допущениях:

- тормозная характеристика замедлителей – случайная величина, распределенная по нормальному закону (с известными математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением); в пределах одной реализации тормозная характеристика постоянна;

- суммарное удельное сопротивление движению вагона – случайная величина, распределенная по нормальному закону (с известными математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением); в пределах одной реализации сопротивление движению постоянно;

- скорость входа вагона в ТП – случайная величина, распределенная по нормальному закону (с известными математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением).

Общая последовательность моделирования одной реализации следующая.

С помощью датчика псевдослучайных чисел разыгрываются значения случайных величин для данной реализации: тормозной характеристики замедлителей, удельного сопротивления движению вагона, скорости входа вагона в ТП, а также задаются начальные значения номера участка и признака окончания переходных процессов (вагон должен входить в замедлитель, уже установленный на требуемую ступень).

По заранее рассчитанной таблице настройки регулятора (таблица скоростей переключения с одной ступени торможения на другую) и текущей скорости выбирается управляющее воздействие (ступень торможения).

По предыдущему и выбранному управляющему воздействию рассчитывается номер очередного «управляемого» участка.

Моделируется движение вагона по текущему участку (с учетом возможного переключения ступени торможения) и вычисляется скорость выхода вагона с данного участка.

Если текущий участок не последний переход к пункту 2.

Фактическая скорость выхода из ТП (скорость выхода с последнего участка) для данной реализации сохраняется для последующего статистического анализа.

Моделирование работы системы для разных алгоритмов управления производилось при одинаковых исходных данных (тип и вес вагона, набор заданных скоростей выхода из ТП, количество реализаций, количество и расположение датчиков скорости и замедлителей ТП, параметры скорости входа в ТП, параметры суммарного сопротивления движению и тормозной характеристики замедлителей). При моделировании работы предложенного алгоритма, принято $V_{II} = V_3$. Результаты моделирования сведены в таблице.

Таблица

Статистические параметры скорости выхода вагона из замедлителя для различных алгоритмов управления

V_3 , м/с	Существующий алгоритм		Предложенный алгоритм	
	$m_{V_{\text{ВЫХ}}}$, м/с	$\sigma_{V_{\text{ВЫХ}}}$, м/с	$m_{V_{\text{ВЫХ}}}$, м/с	$\sigma_{V_{\text{ВЫХ}}}$, м/с
1,5	1,565	0,193	1,516	0,066
2,0	2,038	0,146	2,015	0,046
2,5	2,519	0,116	2,509	0,034
3,0	3,015	0,097	3,016	0,038
3,5	3,518	0,115	3,523	0,026
4,0	4,030	0,101	4,042	0,139
4,5	4,550	0,088	4,470	0,058

Примечание: $m_{V_{\text{ВЫХ}}}$ – математическое ожидание фактической скорости выхода вагона из ТП; $\sigma_{V_{\text{ВЫХ}}}$ – среднеквадратическое отклонение фактической скорости выхода вагона из ТП.

Среднеквадратическое отклонение скорости выхода вагона из ТП определялось по формуле

$$\sigma_{V_{\text{ВЫХ}}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N V_{\text{ВЫХ}n}^2}{N}}, \quad (10)$$

где $V_{\text{ВЫХ}n}$ – фактическая скорость выхода вагона из ТП для n -й реализации имитационной модели; N – количество реализаций имитационной модели на ПЭВМ для заданной скорости выхода из ТП.

Из данных таблицы видно, что точность регулирования скорости по предложенному алгоритму гораздо выше, чем по существующему алгоритму [2]. Так, $\sigma_{V_{\text{ВЫХ}}}$ по предложенному алгоритму в среднем в 2,5 раза, а $(V_3 - m_{V_{\text{ВЫХ}}})$ – в среднем в 1,5 раза меньше, чем по алгоритму [2].

По данным [5] такое повышение точности регулирования должно позволить уменьшить затраты, связанные с боем вагонов и ликвидацией окон, ориентировочно в 2 раза.

Кроме того, предложенный в [3] алгоритм является более «стойким» к отказам (сбоям) датчиков скорости. Так, при отказе (сбое) одного датчика скорости число «коротких» участков уменьшится на 4 и составит 15. Таким образом, даже в случае отказов (сбоев) датчиков скорости, система сохраняет работоспособность с незначительным ухудшением точности регулирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соловьев В. Б. Структурная схема импульсно-релейного регулятора системы АРС с линейным законом воспроизведения // Автоматическое управление и вопросы применения вычислительной техники на железнодорожном транспорте: Труды ДИИТа. – Д., 1972. – Вып. 115/2.
2. Жуковицкий И. В. Сравнение алгоритмов работы импульсно – релейного регулятора системы АРС // Автоматическое управление и вопросы применения вычислительной техники на железнодорожном транспорте: Труды ДИИТа. – Д., 1976. – Вып. 184/8. – С. 37–41.
3. Божко Н. П. Моделирование работы тормозных позиций на сортировочной горке // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях: Межвуз. сб. научн. тр. – Д., 1978. – Вып. 197/12. – С. 73–87.
4. Божко Н. П. Динамические тормозные характеристики весовых и нажимных вагонных замедлителей // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях: Межвуз. сб. научн. тр. – Д., 1978. – Вып. 197/12. – С. 87–100.
5. Устенко А. Б. О некоторых направлениях совершенствования подсистемы прицельного торможения АСУ РСГ // Автоматизированные системы управления технологическими процессами на железнодорожных станциях: Межвуз. сб. научн. тр. – Д., – 1980. – Вып. 211/9. – С. 48–56.

Поступила в редколлегию 19.12.05.