

Интеллектуальные системы управления

УДК 656.212.5:681.3

О. И. Таранец, канд. техн. наук

Кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
им. акад. В. Лазаряна

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКАТЫВАНИЯ ОТЦЕПОВ С СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ СЛУЧАЙНЫХ ФАКТОРОВ

Основным мероприятием, обеспечивающим повышение безопасности движения, улучшение условий труда и уменьшение эксплуатационных расходов на переработку вагонопотоков на сортировочных станциях, является автоматизация процесса расформирования – формирования составов на сортировочных горках. Качество работы автоматизированных систем управления роспуском определяют: полнота и точность учета факторов, влияющих на процесс скатывания отцепов; технические средства реализации управляющих воздействий; технологические принципы определения управляющих воздействий. Комплексный учет влияния указанных факторов на показатели работы сортировочных горок позволит уменьшить как капитальные затраты на их сооружение или реконструкцию, так и эксплуатационные расходы, связанные с их функционированием. В связи с этим моделирование скатывания отцепов с сортировочной горки в условиях действия случайных факторов является актуальной проблемой для улучшения работы железнодорожного транспорта.

В статье рассматривается усовершенствованная имитационная модель процесса скатывания отцепов с сортировочной горки. Сложность оценки технико-эксплуатационных характеристик существующих и проектируемых систем связана с тем, что сортировочные горки работают в условиях неопределенности входной информации. В то же время математические модели процесса скатывания отцепов и методы решения задачи оптимизации режимов торможения базируются на допущении, что значения величин основного удельного сопротивления, сопротивления стрелкам и кривым, сопротивления окружающей среде и ветру, сопротивления тормозным заменителям известны до начала скатывания. Для учета случайности характеристик отцепов и условий их скатывания автором усовершенствована базовая имитационная модель сортировочной горки.

режимы торможения; отцеп; сортировочная горка; имитационная модель; случайные функции; случайные числа

Введение

При проектировании сортировочных горок, усовершенствовании их конструкции и исследовании горочных процессов, в том числе процесса скатывания, достаточно широко используются математические методы.

Сортировочная горка представляет собой сложную систему, в которой происходят десятки параллельных процессов, связанных с движением отцепов и работой горочных устройств. Синхронизация этих процессов в имитационной модели требует использования модели движения.

Впервые необходимость процесса моделирования скатывания отцепов была обозначена в проектных задачах проверки высоты, плана и профиля сортировочных горок и условий разделения отцепов. В этих задачах процесс движения отцепа был представлен при помощи дифференциального уравнения $v' = f(s, v)$.

Первое аналитическое решение уравнения для отцепа как материальной точки и случая, когда $F(s) = i = \text{const}$, было получено проф. В. Н. Образцовым [1]:

$$P = mv \frac{dv}{ds}, \quad (1)$$

где P – движущая сила; m – масса отцепа; s – расстояние скатывания; v – скорость отцепа.

На рис. 1 представлена схема сил, действующих на отцеп в процессе скатывания.

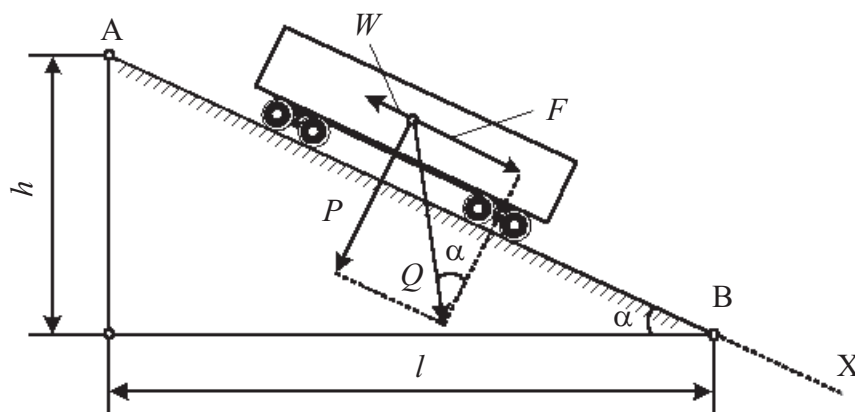


Рис. 1. Силы, действующие на отцеп в процессе скатывания

В этом случае движущая сила определяется из выражения:

$$P = F - W, \quad (2)$$

где F – проекция веса вагона на плоскость скатывания отцепа; W – сила сопротивления движению отцепа.

Проекция веса вагона на плоскость скатывания отцепа определяется по формуле:

$$F = Q \sin \alpha_{\text{н}}, \quad (3)$$

а величина сопротивления движению – по формуле:

$$W = Qw_0 + 0,07 f_{\text{в}} (v + v_{\text{в}})^2 + 0,75 \frac{Q}{R}, \quad (4)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ – угол наклона; w_0 – основное удельное сопротивление движению вагона; $f_{\text{в}}$ – площадь поперечного сечения вагона; $v_{\text{в}}$ – скорость ветра; Q – вес отцепа; R – радиус кривой.

Далее В. Н. Образцовым получено точное решение дифференциального уравнения движения отцепа в виде аналитических выражений вида $s = f(v)$ [2].

С целью учета сил, которые действуют на отцеп, выражение (1) было уточнено. На отдельном шаге удельное сопротивление движения отцепа определяется по формуле

$$W = w_0 + w_{\text{св}} + w_{\text{ск}} + b_{\text{т}}, \quad (5)$$

где w_0 – удельное сопротивление; $w_{\text{ск}}$ – сопротивление стрелкам и кривым; $w_{\text{св}}$ – сопротивление окружающей среде и ветру.

Интегрирование уравнения движения отцепа как материальной точки приводило к достаточно сложным выражениям и громоздким расчетам, что было неудобно для практического использования, особенно в условиях отсутствия средств вычислительной техники. Поэтому для упрощения расчетов проф. В. Д. Никитиным был разработан приближенный аналитический метод решения уравнения движения [3], который базировался на предположении о постоянном сопротивлении движению на некотором участке маршрута скатывания. В дальнейшем делались попытки практических расчетов графоаналитическим и графическим методами [4].

Аналитическое решение дифференциального уравнения скатывания в виде системы функций $v(t)$ и $s(t)$ впервые было получено Ф. Раабом [5].

Для определения величины сопротивления вагонов Всесоюзным научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) был выполнен комплекс экспериментальных исследований основного сопротивления движению вагонов, сопротивления стрелкам и кривым, а также сопротивления окружающей среде и ветру [6]. В результате было установлено, что основное удельное сопротивление движению одиночного вагона представляет собой случайную величину, которая имеет гамма-распределение и в отдельном опыте при имитационном моделировании определяется как

$$w_0 = -\frac{1}{b} \ln \left(\prod_{j=1}^a R_j \right), \quad (6)$$

где a, b – параметры гамма-распределения, которые зависят от весовой категории отцепа; R_j – случайные числа, которые равномерно распределены в интервале $[0, 1]$.

Сопротивление стрелкам и кривым на маршруте скатывания пропорционально квадрату скорости движения и рассчитывается по формуле, указанной в [7]:

$$w_{\text{ск}}(v) = K_{\text{ск}} v^2, \quad (7)$$

где $K_{\text{ск}}$ – средневзвешенный коэффициент сопротивления стрелкам и кривым.

Среднее значение удельной работы сил сопротивления стрелкам и кривым в границах участка скатывания определяется по формуле:

$$\overline{h_{\text{ск}}} = (0,56n + 0,23 \sum a_{\text{ск}}) v^2 \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$

где $n, a_{\text{ск}}$ – соответственно количество стрелочных переводов и сумма углов поворота, с учетом стрелочных углов на маршруте скатывания.

При имитационном моделировании процесса скатывания отцепов работа сил сопротивления движению стрелкам и кривым в границах участка скатывания отцепа может рассматриваться как случайная величина и определяться при помощи выражения

$$h_{\text{ск}} = -0,125 \overline{h_{\text{ск}}} \ln \left(\sum_{j=1}^8 R_j \right). \quad (9)$$

Для определения сопротивления окружающей среде и ветру в [6] проведены наблюдения за скатыванием реальных вагонов и ряд экспериментов по обдуву масштабных моделей вагонов в аэродинамической трубе. В результате для определения удельного сопротивления окружающей среды движению отцепа и ветра было предложено использовать выражение

$$w_{\text{св}} = c v_{\text{от}}^2, \quad (10)$$

где c – приведенный коэффициент воздушного сопротивления; $v_{\text{от}}$ – относительная результирующая скорость отцепа и ветра.

Недостатком упоминаемых работ является то, что сопротивления движению рассматриваются как случайные величины, которые имеют постоянные значения на маршруте скатывания.

В первых теоретических работах по вопросам горочных процессов отцеп рассматривается как материальная точка, что является источником ошибок при

моделировании скатывания многовагонных отцепов. Методы моделирования движения многовагонных отцепов представлены в работах проф. Ю. А. Мухи [8] и проф. Е. М. Шафита [9]. Полученные модели использованы для выполнения горочных расчетов на аналоговых [10] и цифровых ЭВМ [11, 12].

Для усовершенствования учета влияния продольного профиля на процесс движения отцепа проф. Ю. А. Мухой и проф. В. И. Бобровским в [13] предложена вагонная модель отцепа, позволяющая исследовать процесс скатывания неоднородных отцепов. Указанная модель позволяет учитывать эквивалентный уклон, по которому движется каждый вагон отцепа на шаге Δs , по разности отметок его крайних осей. Наиболее точно определять эквивалентный уклон под отцепом позволяет осевая модель отцепа, предложенная проф. В. И. Бобровским [14]. Осевая модель отцепа представляет собой систему шарнирно соединенных материальных точек, соответствующих отдельным колесным парам вагонов. Такая модель дает возможность с достаточной точностью определять все силы (движущие, силы сопротивления, тормозные), действующие на отцеп в процессе скатывания.

Проф. В. И. Бобровский предлагает представление дифференциального уравнения движения отцепа $v' = f(t, v)$ в виде

$$dt = \frac{dv}{g'(i(s) - w_0 - w_{\text{ск}}(v) - w_{\text{св}}(v)) \cdot 10^{-3}}. \quad (11)$$

В указанном выражении делается допущение, что $w_{\text{ск}}$, $w_{\text{св}}$ и уклон $i(s) = i_0$ являются постоянными величинами [15].

С учетом обозначенных допущений, в дальнейшем данный метод будем называть приближенным.

Наиболее точное решение уравнения (11), которое учитывает зависимость сопротивления $w_{\text{ск}}$ и $w_{\text{св}}$ от скорости движения отцепа v , было получено проф. И. В. Жуковицким [16]. Уравнение (11) представляется соответственно в следующем виде:

$$\int_{t_0}^{t_1} dt = \frac{1}{g' \cdot 10^{-3}} \int_{v_0}^{v_1} \frac{dv}{i_0 - w_0 - w_{\text{ск}}(v) - w_{\text{св}}(v)}. \quad (12)$$

Метод, который базируется на интегрировании (12) и не требует указанных выше допущений, в дальнейшем будем называть точным.

Указанные уравнения достаточно точно характеризуют процесс скатывания отцепа с сортировочной горки, но их недостатком является то, что величины основного удельного сопротивления, сопротивления стрелкам и кривым, сопротивления окружающей среде и ветру, сопротивления тормозным замедлителям ($w_{\text{т}}$) имеют постоянные значения на маршруте скатывания. В то же время указанные величины имеют случайный характер на маршруте скатывания.

Исследование влияния случайных факторов на процесс расформирования составов и скатывания отдельных отцепов позволит усовершенствовать методику оценки технико-эксплуатационных характеристик сортировочных горок и разработать более эффективные алгоритмы оперативного управления процессом роспуска составов.

1 Базовая модель скатывания с сортировочной горки

Базовой является модель перемещения отцепа по маршруту скатывания, которая обеспечивает переход между текущими положениями процесса скатывания [9]. Имитационная модель включает модель маршрута скатывания, вагонно-осевую модель отцепа, а также данные об условиях скатывания, необходимые для адекватного моделирования процесса скатывания отцепа с горки.

В соответствии с [9] входная модель маршрута скатывания отцепа с горки представлена выражением:

$$P_u = \{l_u, w_u, \theta_u, i_u, R_{vu}\}, \quad u = 1, \dots, M, \quad (13)$$

где l_u – длина элемента, м; w_u – параметр, который характеризует сопротивление движению стрелок и кривых; θ_u – тип; i_u – уклон, ‰; R_{vu} – радиус вертикальной кривой, м; M – число элементов маршрута.

Весь маршрут скатывания отцепа разделяется на последовательные элементы так, чтобы их границами были характерные точки плана горочной горловины. К таким точкам отнесены начало и конец рельсовых цепей разделительных стрелок и замедлителей, начало и конец рабочих длин замедлителей, начало и конец элементов, которые оказывают дополнительное сопротивление движению (стрелочные переводы, глухие пересечения, кривые), начало и конец сортировочного пути, вершина горки, а также точки перелома профиля. Указанные точки, в зависимости от их типа, могут располагаться в начале элемента, в конце или на обеих его границах.

Входная модель отцепа представляется выражением, которое содержит данные о вагонах отцепа:

$$B_u \{ \gamma_i, v_{Bi}, \rho_i, Q_{Bi}, w_{0i} \}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (14)$$

где γ_i – тип i -го вагона; v_{Bi} – количество осей; ρ_i – тип подшипников; Q_{Bi} – вес; w_{0i} – основное удельное сопротивление; m – количество вагонов в отцепе.

На основе данных входной модели с помощью программных средств строится внутренняя вагонно-осевая модель, которая непосредственно используется для имитационного моделирования скатывания отцепа с горки.

Условия скатывания отцепа задаются списком параметров:

$$Y = \{V_0, S_{\text{прц}}, V_{\text{в}}, \beta, t^{\circ}, \Delta s, N\}, \quad (15)$$

где V_0 – скорость роспуска состава; $S_{\text{прц}}$ – координата точки прицеливания; $V_{\text{в}}$ – скорость ветра; β – направление ветра; t° – температура окружающей среды; Δs – шаг моделирования; N – номер пути скатывания.

Процесс перемещения отцепа моделируется при помощи дифференциального уравнения (11).

Для расчета сил, которые действуют на отцеп в процессе скатывания, используется вагонно-осевая модель отцепа [15]. Мгновенное значение уклона $i(s)$, по которому движется центр массы отцепа, когда его первая ось находится в точке s , определяется по выражению

$$i(s) = \frac{1}{Q_{\text{отц}}} \sum_{i=1}^{m_{\text{отц}}} q_i \sum_{r=1}^{v_{Bi}} i(s_{ir}), \quad (16)$$

где $Q_{\text{отц}}$ – масса отцепа; q_i – нагрузка на ось i -го вагона в отцепе ($q_i = Q_{\text{в}} / v_{Bi}$); s_{ir} – координата точки, в которой находится r -я ось i -го вагона; $i(s_{ir})$ – значение уклона, на котором находится r -я ось i -го вагона.

Сопротивление стрелкам и кривым $w_{\text{ск}}$ определяется как функция мгновенной скорости отцепа (7). При этом для расчета средневзвешенного коэффициента сопротивления стрелкам и кривым в модели горки содержится информация о параметрах и размещении стрелок и кривых на путях скатывания.

Удельная сила сопротивления окружающей среде и ветру определяется по формуле (10).

Для моделирования торможения отцепов на тормозных позициях в модели определяется удельное сопротивление тормозным замедлителям, которое рассматривается как сумма удельных тормозных сил замедлителей разного типа, которые могут одновременно действовать на длинный отцеп:

$$w_{\text{т}} = w_{\text{тн}} + w_{\text{тв}} + w_{\text{РНЗ}}, \quad (17)$$

где $w_{\text{тн}}$, $w_{\text{тв}}$, $w_{\text{РНЗ}}$ – удельные тормозные сопротивления соответственно нажимных, весовых и весово-нажимных (РНЗ) замедлителей.

Величина $w_{\text{тн}}$ для замедлителей нажимного типа определяется по формуле [7]:

$$w_{\text{тн}} = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v w_{\text{тн}i}, \quad (18)$$

где $w_{\text{тн}i}$ – удельная тормозная сила замедлителя нажимного типа, которая действует на i -ю ось отцепа; ν – количество осей в отцепе.

Для замедлителей весового типа величина $w_{\text{тв}}$ определяется с учетом нагрузки на ось отцепа q_i , который тормозится:

$$w_{\text{тв}} = \frac{1}{Q_{\text{отц}} \sum_{i=1}^{m_{\text{отц}}} q_i \sum_{r=1}^{\nu_{\text{в}i}} w_{\text{тв}i}}. \quad (19)$$

Величина $w_{\text{тв}}$ определяется для осей отцепа, которые двигаются на очередном шаге перемещения Δs в границах замедлителей весового типа, аналогично (18). При этом значение тормозной мощности весового замедлителя $H_{\text{т}}$ выбирается в зависимости от количества осей вагона $\nu_{\text{в}}$, который тормозится.

Для замедлителей РНЗ, тормозная характеристика которых постоянна и не зависит от количества осей, которые тормозятся, величина удельной тормозной силы определяется следующим образом:

$$w_{\text{РНЗ}} = \sum_{k=1}^z w_{\text{РНЗ}k}, \quad (20)$$

где $w_{\text{РНЗ}k}$ – удельная тормозная сила k -го замедлителя данного типа; z – количество замедлителей РНЗ на маршруте скатывания отцепа.

2 Усовершенствованная модель сортировочной горки

Процесс скатывания отцепа описывается дифференциальным уравнением:

$$\nu' = \frac{d\nu}{dt} = g'(i - w_0 - w_{\text{св}}(\nu) - w_{\text{ск}}(\nu) - b_{\text{т}}) \cdot 10^{-3}, \quad (21)$$

где i – уклон пути на маршруте скатывания; w_0 – основное удельное сопротивление движению отцепа, Н/кН; $w_{\text{св}}$ – дополнительное удельное сопротивление движению от окружающей среды, Н/кН; $w_{\text{ск}}$ – дополнительное удельное сопротивление, которое возникает при прохождении стрелок и кривых Н/кН; ν – скорость отцепа, м/с; g' – ускорение свободного падения с учетом инерции частей вагона, которые вращаются, м/с²; $b_{\text{т}}$ – сопротивление движению от тормозных замедлителей, Н/кН:

$$b_{\text{т}} = F(\nu_{\text{тп}}^{\text{вх}}, \nu_{\text{тп}}^3, \sigma_{\text{тп}}), \quad (22)$$

где $\nu_{\text{тп}}^{\text{вх}}$ – скорость входа отцепа на тормозную позицию, км/ч; $\nu_{\text{тп}}^3$ – случайная величина скорости выхода отцепа с тормозной позиции, которая распределена

по нормальному закону, км/ч; $\sigma_{\text{тп}}$ – математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение случайной величины скорости отцепа.

Для исследования процесса роспуска составов в условиях действия случайных факторов усовершенствована базовая модель (11) скатывания отцепов с горки.

Согласно [2], параметры и закон распределения случайной величины w_0 зависят от весовой категории вагонов q и типа подшипников. Для вагонов с роликовыми подшипниками величина w_0 имеет гамма-распределение с коэффициентами α и β :

$$F(w_0) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{w_0} e^{-\beta w_0} w_0^{\alpha-1} dw_0. \quad (23)$$

На рис. 2 приведен график плотности распределения $f(w_0)$ отцепов легкой и тяжелой весовых категорий.

Рассмотрим более подробно моделирование случайной величины основного удельного сопротивления на маршруте скатывания отцепа.

Пусть w_1, w_2, \dots, w_τ – временной ряд, который описывает изменения показателя w , «колебательного характера», $t = 1, \tau$ [17], а $w(t)$ – предполагаемая теоретическая зависимость, соответствующая экспериментальной.

Функцию $w(t)$ в исследуемом интервале времени можно, при выполнении некоторых условий, представить рядом синусоидальных и косинусоидальных функций (ряд Фурье), например, если функция кусочно-монотонная и ограниченная (условие Дирихле).

Первая гармоника имеет период, равный длине исследуемого периода. Вторая – равный половине основного, третья – равный одной третьей основного и т. д. В общем, если имеется τ наблюдений, то число гармоник не будет превышать $\frac{\tau}{2}$. Для функции колебательного характера, как правило, их необходимо

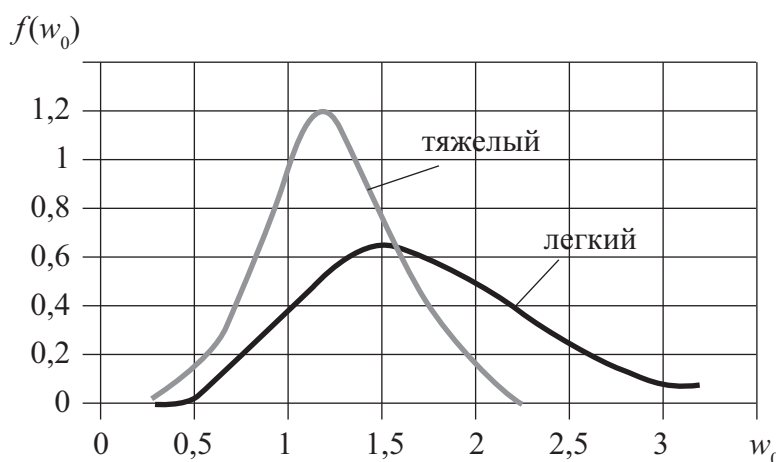


Рис. 2. График плотности распределения $f(w_0)$ отцепов легкой и тяжелой весовых категорий

определить меньше, также функции хорошо описываются несколькими первыми гармониками.

Записываем $w(t)$ в виде суммы $\frac{\tau}{2}$ гармоник:

$$w_0(t) = \overline{w_0} + \sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} \left(A_i \cos \frac{2\pi t i}{\tau} + B_i \sin \frac{2\pi t i}{\tau} \right), \quad (24)$$

где A_i, B_i – коэффициенты ряда Фурье; $\frac{2\pi t i}{\tau}$ – частота i -й гармоники; τ – продолжительность измерения, с; i – количество гармоник; $\overline{w_0}$ – математическое ожидание величины сопротивления движению, кгс/тс:

$$\overline{w_0} = -\frac{1}{b} \ln \left(\prod_{j=1}^a R_j \right), \quad (25)$$

где a, b – параметры гамма-распределения; R_j – случайные числа, равномерно распределенные в интервале (0; 1).

Коэффициенты A_i, B_i и a_0 оцениваются по методу наименьших квадратов:

$$\sum_{t=1}^{\tau} (y_t - y(t))^2 \rightarrow \min. \quad (26)$$

Получение формул для коэффициентов облегчается благодаря свойству ортогональности:

$$\sum_{t=1}^{\tau} \sin \left(\frac{2\pi}{p} i t \right) \sin \left(\frac{2\pi}{p} j t \right) = \begin{cases} 0, i \neq j; \\ \frac{\tau}{2}, i = j \neq 0 \neq \frac{\tau}{2}. \end{cases} \quad (27)$$

Подобное равенство имеет место, если оба члена заменены косинусами; если же один член заменен косинусом, то сумма в левой части равна нулю.

Обозначим:

$$S(a_0, A_1, A_2, A_{\frac{\tau}{2}}, B_{\frac{\tau}{2}}) = \sum_{t=1}^{\tau} w_t = -a_0 - \sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} \left[A_i \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} i t \right) + B_i \cos \left(\frac{2\pi}{\tau} i t \right) \right]^2.$$

Оценки параметров, A_i, B_i и a_0 находятся из системы уравнений:

$$\sum_{t=1}^{\tau} w_t = \tau a_0 + \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} A_i \sin \left(\frac{2\pi i t}{\tau} \right) + \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} B_i \cos \left(\frac{2\pi i t}{\tau} \right);$$

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^{\tau} w_i \sin\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) &= a_0 \sum_{i=1}^{\tau} \sin\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) + \\
&+ \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} A_i \sin\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) A_i \sin\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) + \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} A_i \sin\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) A_i \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right); \\
\sum_{i=1}^{\tau} w_i \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) &= a_0 \sum_{i=1}^{\tau} \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) + \\
&+ \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} A_i \sin\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) B_i \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) + \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} A_i \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) A_i \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right); \\
j &= 1, \frac{\tau}{2}.
\end{aligned}$$

Оценки параметров A_i , B_i и a_0 имеют вид:

$$\begin{aligned}
a_0 &= \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} w_i; \\
A_i &= \frac{2}{\tau} w_i \sin\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right); \\
B_i &= \frac{2}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} w_i \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right),
\end{aligned} \tag{28}$$

если $i < \frac{p}{2}$ при $i = \frac{p}{2}$, $A_{\frac{\tau}{2}} = 0$, $B_{\frac{\tau}{2}} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (-1)^i w_i$.

Полученные уравнения позволят моделировать величину основного удельного сопротивления на маршруте скатывания.

Для моделирования случайного значения дополнительного удельного сопротивления, которое возникает при прохождении стрелок и кривых $w_{\text{ск}}$, используется выражение [7]:

$$w_{\text{ск}}(v) = v^2 \sum_{j=1}^{m_{\text{отц}}} q_{\text{отц}j} \sum_{i=\alpha_j}^j \frac{C_{\text{ски}i}}{l_{\text{ски}}}, \tag{29}$$

где v – скорость скатывания отцепа, м/с; $m_{\text{отц}}$ – количество вагонов в отцепе; $q_{\text{отц}j}$ – масса отцепа, т; $l_{\text{ски}}$ – длина участка скатывания отцепа, м.

Случайное значение $C_{\text{ски}}$ для отдельной стрелки или кривой определяется по формуле:

$$C_{ски} = -\frac{0,56\theta_n + 0,23\varphi_n}{8} \ln \prod_{k=1}^8 R_k, \quad (30)$$

где θ_n – тип n -го элемента ($\theta_n = 0$ – кривая; $\theta_n = 1$ – стрелка); φ_n – угол поворота кривой n -го элемента, град; R_k – случайные числа, распределенные равномерно в интервале (0; 1).

Случайная величина дополнительного удельного сопротивления движению воздушной среды $w_{св}$ на маршруте скатывания отцепа моделируется при помощи выражения (10). В указанном выражении $v_{от}$ относительная результирующая скорость отцепа и ветра, м/с, которая определяется по формуле:

$$v_{от} = v^2 + v_B^2 \pm 2vv_{от} \cos \beta, \quad (31)$$

где v – скорость скатывания отцепа, м/с; β – угол между направлением ветра и осью участка пути, по которому движется отцеп; v_B – скорость ветра, которая моделируется при помощи гармонической функции, как и величина основного удельного сопротивления, м/с:

$$v_B = \overline{v_B} + \sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} \left(A_i \cos \frac{2\pi i}{\tau} + B_i \sin \frac{2\pi i}{\tau} \right), \quad (32)$$

где $\overline{v_B}$ – математическое ожидание величины скорости ветра, м/с.

Направление ветра в модели моделируется при помощи следующего выражения:

$$\alpha(t) = \overline{\alpha} + \sum_i \left(A_i \cos \frac{2\pi t}{\tau} + B_i \sin \frac{2\pi t}{\tau} \right), \quad (33)$$

где $\overline{\alpha}$ – математическое ожидание угла направления ветра, град.

В [18] рассмотрены разные методы определения массы, а также приведены результаты исследования случайной величины массы вагона. В отдельном опыте значение этой случайной величины может быть смоделировано при помощи выражения:

$$Q_B = M[Q] + \sigma[Q] \cdot z, \quad (34)$$

где $M[Q]$ – математическое ожидание случайной величины массы отцепа, т; $\sigma[Q]$ – величина различия массы груза указанной в перевозочных документах и массы груза после перевешивания.

Математические ожидания случайных величин сопротивления движению $\overline{w_0}$, w_T моделируются в соответствии с [7].

Заключение

Существующие имитационные модели для исследования процесса скатывания отцепов позволяют лишь сравнивать варианты конструкций сортировочных горок и не учитывают случайный характер параметров отцепов на маршруте скатывания и условий окружающей среды, которые влияют на показатели работы сортировочных горок. В статье представлена имитационная модель скатывания отцепов с горки, в которой сопротивления движению рассматриваются как случайные функции. Предложенные методы и модели реализованы в виде программного комплекса для ЭВМ «Скатывание одиночного отцепа».

Разработанные автором имитационные модели и программные средства позволяют сравнивать варианты конструкции сортировочных горок, оценивать эффективность их технического оборудования и алгоритмов управления систем автоматического роспуска составов, которые проектируются при автоматизации сортировочных горок, а также решать разнообразные оптимизационные задачи.

Неопределенность параметров отцепов и условий скатывания влияет на интервальное и прицельное регулирование скорости, в связи с этим задача уточнения характеристик отцепов является актуальной.

Библиографический список

1. Образцов В. Н. К вопросу о тяговых расчетах сортировочных горок / В. Н. Образцов // Труды МИИТа. – Вып. 9. – М., 1928. – С. 129–152.
2. Образцов В. Н. Станции и узлы / В. Н. Образцов, В. Д. Никитин, Ф. Н. Шаульский, С. П. Бузанов. – М. : Трансжелдориздат, 1949. – С. 540.
3. Никитин В. Д. Проектирование продольного профиля парков сортировочной станции с помощью математического моделирования маневровых процессов на ЭЦВМ / В. Д. Никитин, С. С. Мацкель // Вопросы расчета и проектирования железнодорожных станций и узлов : тр. МИИТа. – Вып. 304. – М. : Транспорт, 1969. – С. 4–41.
4. Ющенко Н. Р. Графический метод построения кривых скорости и времени скатывания отцепов с горки / Н. Р. Ющенко // Труды ДИИТа. – Вып. 21. – М. : Трансжелдориздат, 1951. – С. 271–287.
5. Raab F. Bewegungsgleichungen und nomographische Rechentafeln als Hilfsmittel für ablaufdynamischen Untersuchungen / F. Raab. – Rangiertechnik, 1956. – Н. 16.
6. Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок / Е. А. Сотников // Труды ВНИИЖТа. – Вып. 545. – М. : Транспорт, 1975. – 151 с.
7. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР. ВСН 207–89. – М. : Транспорт, 1992. – 104 с.
8. Муха Ю. А. Построение кривых скорости скатывания длинных отцепов с сортировочной горки и сравнение этих кривых с опытными / Ю. А. Муха // Вопросы

- механизации и автоматизации сортировочных горок : тр. ДИИТа. – Вып. 41. – Днепропетровск, 1962. – С. 85–110.
9. Шафит Е. М. Дифференциальные уравнения скатывания отцепов с сортировочной горки при различных способах аппроксимации продольного профиля / Е. М. Шафит // Вопросы механизации и автоматизации сортировочных горок : тр. ДИИТа. – Вып. 52. – М. : Транспорт, 1965. – С. 55–72.
 10. Шафит Е. М. Машинное решение дифференциальных уравнений скатывания отцепов с сортировочной горки / Е. М. Шафит // Вопросы механизации и автоматизации сортировочных горок : труды ДИИТа. – Вып. 52. – М. : Транспорт, 1965. – С. 73–95.
 11. Буянова В. К. Моделирование на ЭЦВМ процесса роспуска вагонов с сортировочной горки / В. К. Буянова // Вестник ВНИИЖТа. – 1965. – № 6. – С. 60–64.
 12. Павлов В. Е. Об алгоритме расчета скорости вагона на горке в зависимости от расстояния / В. Е. Павлов // Труды ЛИИЖТ. – Вып. 259. – Л. : Транспорт, 1967. – С. 95–100.
 13. Муха Ю. А. Моделирование на ЭЦВМ процесса скатывания отцепов с сортировочной горки / Ю. А. Муха, В. И. Бобровский // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях : тр. ДИИТа. – Вып. 90/6. – Днепропетровск, 1969. – С. 53–63.
 14. Муха Ю. А. Алгоритмы и библиотека программ для моделирования на ЭВМ «Наири-К» сортировочного процесса на горках / Ю. А. Муха, В. И. Бобровский // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях : тр. ДИИТа. – Вып. 194/11. – Днепропетровск, 1977. – С. 53–102.
 15. Бобровский В. И. Дифференциальные уравнения движения отцепа и методы их решения / В. И. Бобровский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1996. – № 6. – С. 34–39.
 16. Жуковицкий И. В. Решение дифференциального уравнения свободного скатывания отцепа с горки / И. В. Жуковицкий // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1997. – № 4. – С. 14–17.
 17. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М., 1974. – 832 с.
 18. Устав железных дорог Украины : утв. постановлением Кабинета министров Украины от 06.04.98 № 457. – Киев : Транспорт, 1998. – 83 с.

Taranets Olga I.

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport
named after Academician V. Lazaryan

**Simulation of set of cars rolling from the hump
under the influence of random factors**

The basic measure that provides traffic safety raise, working conditions improvement and operating costs of traffic volume conversion reduction on marshalling yards is automation of

forming and disbanding of trains on humps processes. The quality of automated detaching control system is determined by the following factors: fullness and accuracy of accounting of factors affecting the set of cars rolling process; technical means of control implementation; technological principles of control. Complex accounting of influence of declared factors on the parameters of hump operation allows to reduce capital expenditures for their construction and reconstruction as well as operating costs related with their functioning. Thereby, simulation of set of cars rolling from the hump under the influence of random factors is an actual problem for the railway transport.

In this article the enhanced simulation model of set of cars rolling from the hump is described. The complexity of evaluation of technical and operational characteristics of existing systems and being developed ones is connected with the fact that humps are functioning under the conditions of uncertainty of input data. But mathematical models of set of cars rolling process and methods of solution of braking mode optimization problem are based on the assumption that resistance of air and wind, resistance of points and curves, resistance of retarding mechanisms for the movement of set of cars are known before the start of rolling. Thereby for accounting of random characteristics of sets of cars and condition of their rolling the basic simulation model of hump was enhanced.

braking mode; set of cars; hump; simulation model; random functions; random values

Reference

1. Obraztsov V.N. On the question of traction calculations marshalling yards. Proceedings of the MIIT, vol. 9, Moscow, 1928, pp. 129–152.
2. Obraztsov V.N., Nikitin V.D., Shaulsky F.N., Buzanov S.P. Stations and units. Moscow, Transzheldorizdat, 1949, 540 p.
3. Nikitin V.D., Matskel S.S. Design of the longitudinal profile of parks yard with the help of mathematical modeling of processes by computer shunting. Questions of calculation and design of railway stations and junctions. MIIT Proceedings, vol. 304, Moscow, Transport, 1969, pp. 4–41.
4. Yushchenko N.R. graphical method of constructing curves of speed and time to unhook from the rolling hills DIIT. Works, vol. 21, Moscow, Transzheldorizdat, 1951, pp. 271–287.
5. Raab F. Bewegungsgleichungen und nomographische Rechentafeln als Hilfsmittel für ablayfdynamischen Untersuchungen. Rangiertechnik, 1956, H. 16.
6. Sotnikov E. A. Resist the movement of freight cars while sliding down a rollercoaster VNIIZhT. Works, vol. 545, Moscow, Transport, 1975, 151 p.
7. Rules and regulations of the design of sorting devices on the railways of the USSR. VSN 207–89. Moscow, Transport, 1992, 104 p.
8. Muha Y.A. Deriving speed rolling long unhooked with hump and a comparison of these curves with experienced. Questions of mechanization and automation of gravity humps. DIIT Proceedings, vol. 41, Dnepropetrovsk, 1962, pp. 85–110.
9. Shafit E. M. Differential equations with rolling unhook hump at various ways of approximating the longitudinal profile. Questions of mechanization and automation of gravity humps. Proceedings of the DTIS, vol. 52, Moscow, Transport, 1965, pp. 55–72.

10. Shafit E.M. Machinery solution of differential equations with rolling unhook hump. Questions of mechanization and automation of gravity humps. Proceedings of the DTIS, vol. 52, Moscow, Transport, 1965, pp. 73–95.
11. Buyanova V.K. By computer modeling of the dissolution of the wagons hump. Herald VNIIZhT, 1965, issue 6, pp. 60–64.
12. Pavlov V.E. On an algorithm for calculating the speed of the car on a hill depending on the distance LIIZhT. Works, vol. 259, Leningrad, Transport, 1967, pp. 95–100.
13. Muha Y.A., Bobrowski V.I. By computer simulation of the process rolling to unhook hump. Questions of mechanization and automation of the sorting process at the stations. DIIT Proceedings, vol. 90/6, Dnepropetrovsk, 1969, pp. 53–63.
14. Muha Y.A., Bobrowski V.I. Algorithms and software library for computer simulation of «Nairi-K» screening process on a rollercoaster. Mechanization and automation of the sorting process at the stations. DIIT Proceedings, vol. 194/11, Dnepropetrovsk, 1977, pp. 53–102.
15. Bobrowski V.I. Differential equations of motion unhooked and solution methods. Information-management systems in rail transport, 1996, issue 6, pp. 34–39.
16. Zhukovitsky I.V. Solutions of differential equations with a free rolling unhooked from hump. Information-management systems in rail transport, 1997, issue 4, pp. 14–17.
17. Korn G., Korn T. Reference mathematics (for scientists and engineers). Moscow, 1974, 832 p.
18. Charter of railways of Ukraine. Approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine of 06.04.98 № 457, Kiev, Transport, 1998, 83 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии И. М. Кокуриным
Поступила в редакцию 26.11.2015, принята к публикации 24.12.2015*

ТАРАНЕЦ Ольга Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна.
e-mail: taranetsolga@rambler.ru

© Таранец О.И., 2016