

СССР — МПС  
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

---

*Доцент, кандидат технических наук Е. М. ШАФИТ.*

**Теоретические основы автоматического  
управления ролпуском составов  
на сортировочных горках**

**Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени доктора технических наук**

Днепропетровск-1966

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании ученого совета или прислать свои отзывы о работе по адресу:

Днепропетровск-10, Университетская, 2, Институт инженеров железнодорожного транспорта.

Публичная защита диссертации состоится на заседании Ученого совета в марте 1966 года.

Дата отправки автореферата 31 января 1966 года.

С С С Р — М П С  
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

---

*Доцент, кандидат технических наук Е. М. ШАФИТ*

2898a Теоретические основы автоматического  
управления роспуском составов  
на сортировочных горках

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени доктора технических наук

Днепропетровск — 1966

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Экспериментальная часть работы проведена на сортировочных станциях Основа, Ленинград-Сортировочный-Московский и Лосиноостровская.

## В В Е Д Е Н И Е

В Программе Коммунистической партии Советского Союза и в решениях сентябрьского (1965 г.) Пленума ЦК КПСС определены главные направления развития комплексной автоматизации и механизации производства, обеспечивающих его высокую экономическую эффективность и основанных на широком внедрении современных технических средств и, в том числе, средств вычислительной техники.

К числу первоочередных задач, связанных с дальнейшим развитием автоматизации производственных процессов на транспорте, относится автоматизация крупных горочных сортировочных станций и, в первую очередь, основного звена этих станций — сортировочных горок.

За последние годы в области автоматизации работы сортировочных горок в СССР и за рубежом выполнен ряд теоретических исследований и практических разработок. В СССР, в частности, большой вклад в развитие проблемы автоматизации сортировочных горок внесли проф С. П. Бузанов, А. М. Долаберидзе, А. М. Карпов, В. Д. Никитин, Н. Р. Ющенко, А. А. Яблонский, кандидаты техн. наук И. И. Страковский, Н. М. Фонарев, инж. В. Д. Ратников, Ю. В. Ульянычев и др.

В результате проведения большого количества экспериментальных, исследовательских и конструкторских работ в настоящее время созданы и проходят опытную эксплуатацию две системы автоматического регулирования скорости (АРС) скатывания отцепов — система АРС ЦНИИ и система АРС ГТСС.

Создание систем АРС является важным шагом вперед в вопросе развития средств автоматизации сортировочного процесса. Вместе с тем практика эксплуатации сортировочных горок, оборудованных этими системами, показала, что они еще не обеспечивают полностью выполнение поставленных задач. В частности еще невелики скорости роспуска составов, не обеспечивается необходимая точность прицельного торможения отцепов, имеется ручное вмешательство операторов в работу тормозных позиций и применение, в отдельных случаях, башмачного торможения на путях сортировочного парка.

Аналогичная картина имеет место и на зарубежных сортировочных станциях, оборудованных устройствами АРС.

Таким образом следует констатировать, что проблема автоматизации работы сортировочных горок, как в СССР, так и за рубежом полностью еще не решена, а отдельные разработанные системы АРС нуждаются в дальнейшем развитии и совершенствовании.

При этом намечается два этапа развития горочной автоматики:

а) дальнейшее совершенствование схем и устройств автоматического регулирования скорости скатывания отцепов по спусковой части горки;

б) создание систем автоматического управления роспуском составов, включающих в себя устройства телеуправления горочными локомотивами (ТГЛ) и автоматического регулирования скорости скатывания отцепов (АРС). Между этими устройствами должно обеспечиваться необходимое взаимодействие, позволяющее реализовать наиболее высокую скорость роспуска каждого расформируемого состава.

**Отсюда вытекает, что автоматическое регулирование скорости скатывания отцепов является частной задачей, которая должна входить, как составная часть, в общую проблему автоматического управления роспуском составов, которая, в свою очередь, является частью главной задачи создания станций — автоматов.**

В связи со значительной сложностью этой проблемы, дальнейшее ее развитие невозможно без соответствующего развития теоретических предпосылок, которые учитывают все многообразие факторов, влияющих на ход автоматизируемого процесса.

Автоматическое управление любым производственным процессом и, в том числе, роспуском составов может быть расчленено на две укрупненные группы операций:

а) получение, передача и переработка информации с целью установления параметров управления, обеспечивающих оптимизацию управляемого процесса,

б) воздействие на объект управления в соответствии с выработанным заданием и контроль за правильным выполнением этого задания.

Практическое осуществление первой группы операций должно основываться на исследовании эксплуатационных особенностей управляемого процесса. В конкретном применении к проблеме автоматизации роспуска это означает необходимость разработки таких алгоритмов, машинная реализация которых позволит

получить наиболее высокий темп расформирования каждого состава при соблюдении требований безопасности работы сортировочной горки.

Вторая группа операций непосредственно связана с работой устройств автоматического управления. На сортировочных горках к таким устройствам, в первую очередь, относятся автоматические регуляторы каждой тормозной позиции, осуществляющие с помощью замедлителей регулирующее воздействие на скорость скатывающихся отцепов. Качество этого регулирующего воздействия и, следовательно, создание условий, необходимых для оптимального управления роспуском, зависит от правильного выбора режимов работы регуляторов и параметров отдельных их звеньев.

Решение этой важной в практическом и теоретическом отношении задачи может быть произведено только на основе исследования динамики работы автоматических регуляторов системы АРС.

**Таким образом, теория автоматического управления роспуском составов должна базироваться на комплексном исследовании эксплуатационных принципов, обеспечивающих необходимый оптимум сортировочной работы и технических средств, реализующих эти принципы.**

Сформулированное положение определяет основное направление исследования, произведенного в настоящей работе.

В соответствии с этим положением в работе рассматриваются:

а) эксплуатационные принципы оптимального управления сортировочным процессом;

б) алгоритмы и методы машинной переработки информации, необходимой для выработки соответствующих параметров управления;

в) динамика работы автоматических регуляторов, обеспечивающих в системе автоматического управления выполнение заданных параметров с установленной степенью точности.

## Р А З Д Е Л I.

### МАШИННАЯ ПЕРЕРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ АРС

В системах АРС основным параметром регулирования является величина скорости выхода отцепов с тормозных позиций, которая устанавливается для каждого отцепа в результате машинной переработки информации о нем. При этом алгоритмом служит уравнение скатывания отцепа, которое может быть представлено, как в конечной (алгебраической), так и дифференциальной форме. В настоящее время в системах АРС применяются в подавляющем большинстве алгебраические уравнения скатывания, а их решение осуществляется в основном при помощи счетно-решающих устройств, составленных из пассивных элементов. Кроме того указанные уравнения получены при условии отождествления движения отцепа и движения тяжелой материальной точки. С этой точки зрения они не обеспечивают выполнение основного условия, предъявляемого к алгоритмам машинной переработки информации — не являются массовыми алгоритмами, так как не учитывают количества и размещения вагонов в скатывающихся отцепах.

В разделе приводится вывод дифференциальных уравнений, обобщенных для отцепов различного состава. Такие уравнения отвечают основным требованиям, предъявляемым к алгоритмам, так как:

а) учитывают особенности движения отцепов с различными характеристиками, а также все виды информации, оказывающие влияние на точность вычисления параметров регулирования;

б) обеспечивают переработку информации с использованием электронных вычислительных машин;

в) сохраняют постоянную структуру для всех категорий отцепов.

## I. Дифференциальные уравнения скатывания, обобщенные для отцепов различного типа

При выводе уравнений рассматривается общий случай движения отцепов по приведенному профилю, учитывающему сопротивление в кривых и на стрелочных переводах, и имеющему произвольное криволинейное очертание, заданное функцией  $y = \varphi(s)$  где  $y$  — разность отметок вершины горки и данной точки пути скатывания с дуговой координатой  $s$ .

При этом приняты следующие расчетные схемы:

а) для одипочного отцепа — движение тяжелой материальной точки;

б) для однородного отцепа — движение нерастяжимого гибкого стержня;

в) для неоднородного отцепа — движение системы тяжелых материальных точек, связанных между собой нерастяжимыми связями.

В результате получена обобщенная форма записи дифференциального уравнения управляемого скатывания отцепа.

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 s}{dt^2} = \frac{v}{c} \frac{dv}{ds} = q' \{ F(s) - w_0 \cdot 10^{-3} \mp c (v \pm v_w)^2 \cdot 10^{-3} - \sum_{k=1}^m \gamma_{тк} [\sigma_0 (s - s_k) - \sigma_0 (s - s_k - l_{тк})] \} \quad (1)$$

- где  $v$  — скорость движения отцепа;
- $w_0$  — основное удельное сопротивление движению отцепа;
- $c$  — коэффициент, характеризующий аэродинамические свойства отцепа;
- $v_w$  — скорость ветра;
- $q'$  — ускорение свободного падения, в которое включена поправка, учитывающая инерцию вращающихся частей отцепа;
- $\gamma_{тк}$  — средняя тормозная характеристика замедлителей  $k$ -той тормозной позиции, рассчитанная с учетом длины колесной базы (расстояния между крайними осями) отцепа;
- $s_k$  — координата начала  $k$ -той тормозной позиции;
- $l_{тк}$  — длина зоны торможения  $k$ -той тормозной позиции для данного отцепа;

$\varphi_0$  — единичная функция.

$$\begin{aligned}\varphi_0(s) &= 1 \text{ при } s \geq 0 \\ \varphi_0(s) &= 0 \text{ при } s < 0.\end{aligned}$$

При свободном (неуправляемом) скатывании отцепа в правой части уравнения (1) исключаются члены, стоящие под знаком суммы.

В уравнение (1) входит функция  $F(s)$ , которая выражает действие на отцеп силы тяжести.

В общем виде ее выражение зависит от типа отцепа:

- а) для одиночного вагона:  $F(s) = i(s)$  (2)  
где  $i$  — уклон профиля в точке с координатой  $s$   
б) для однородного отцепа:

$$F(s) = \frac{\varphi(s) - \varphi(s - l_0)}{l_0} \quad (3)$$

где  $l_0$  — длина отцепа;

в) для неоднородного отцепа:

$$F(s) = \sum_{z=1}^r \gamma_z \varphi'(s - l_z) \quad (4)$$

где  $r$  — количество вагонов в отцепе;

$\gamma_z$  — коэффициент, характеризующий отношение веса  $z$ -того вагона к весу всего отцепа;

$l_z$  — расстояние от передней оси отцепа до центра тяжести  $z$ -того вагона.

Конкретное выражение функции  $F(s)$  зависит от способа аппроксимации продольного профиля сортировочной горки.

## II. Аппроксимация продольного профиля сортировочных горок

В настоящее время общепринятой формой представления продольного профиля сортировочных горок является его кусочно-линейная аппроксимация. При этом он задается ломаной линией, состоящей из прямолинейных отрезков различной длины, а функция  $F(s)$  в уравнении (1) в точках перелома профиля имеет конечные разрывы и становится кусочно-постоянной. Это весьма усложняет аналитическое и машинное решение дифференциальных уравнений скатывания, особенно для длинных однородных и неоднородных отцепов.

Анализ результатов геодезической съемки продольного профиля ряда сортировочных горок показывает, что он по своему характеру весьма близок к непрерывной гладкой кривой. Поэтому для облегчения аналитического и машинного решения уравнений скатывания, его целесообразно аппроксимировать гладкой кривой, непрерывной в заданном интервале.

При этом функция  $F(s)$  также становится гладкой и непрерывной в том же интервале.

Для действующих сортировочных горок непрерывная аппроксимация означает статистический подбор такой кривой, для которой отклонение ее ординат от фактических отметок продольного профиля будет минимальным. Для вновь сооружаемых или реконструируемых горок непрерывная аппроксимация сводится к расчету параметров кривой заданного типа, при которых она пройдет через систему фиксированных точек, найденных заранее в соответствии с существующей методикой проектирования сортировочных горок. Второй случай технически решается значительно проще и может быть представлен как частный случай первого. Поэтому в главе рассматривается только методика непрерывной аппроксимации приведенного продольного профиля действующих сортировочных горок.

Качественный анализ приведенных профилей ряда горок показывает, что наиболее подходящим типом кривых для их непрерывной аппроксимации являются кривые экспоненциального и параболического типа. В соответствии с этим в главе сравниваются три типа экспонент и параболы, описываемые полиномами второй, третьей и четвертой степени.

Расчетные параметры кривых для конкретного продольного профиля определены на основе применения метода средних (для экспоненциальных кривых) и метода наименьших квадратов (для парабол).

Сравнение рассматриваемых вариантов кривых производится по величине среднеквадратического отклонения их ординат от соответствующих ординат приведенного профиля на участке от вершины горки до каждой точки аппроксимации.

Произведенные расчеты показали, что наиболее подходящими типами аппроксимирующих кривых являются:

а) для спускной части горки — парабола четвертой степени и экспонента, описываемая уравнением  $y = a - b s^c e^{ds}$ , при чем последняя дает удовлетворительные результаты только в более пологой части профиля (в пределах стрелочной зоны);

б) для перевальной части горки — парабола четвертой степени.

При аппроксимации продольного профиля полиномом четвертой степени среднеквадратические отклонения для этой кривой незначительно превышают соответствующие отклонения спрямленного приведенного профиля и колеблются в пределах 0,06 — 0,09 м.

Помимо оценки точности аппроксимации по величине среднеквадратической ошибки, в главе исследовано влияние способа аппроксимации на точность решения дифференциальных уравнений скатывания.

При этом доказано, что применение непрерывной аппроксимации профиля весьма незначительно снижает точность расчета скорости на отдельных участках пути скатывания отцепов, при чем полученное снижение находится в допустимых пределах (до 5%).

В тех случаях, когда полученная степень точности недостаточна, непрерывную аппроксимацию профиля следует производить по отдельным участкам.

### **III. Приближенное аналитическое интегрирование дифференциальных уравнений скатывания, обобщенных для отцепов различного типа**

Целью аналитического интегрирования дифференциальных уравнений скатывания является получение соответствующих расчетных формул, выражающих зависимость  $v(s)$ . Точное решение этих уравнений затрудняется наличием в их правой части члена, отражающего влияние воздушной среды.

Поэтому при приближенном аналитическом решении обобщенных дифференциальных уравнений скатывания принимается общепринятое в этих случаях допущение, в соответствии с которым переменная величина сопротивления воздушной среды заменяется средним постоянным значением. Решение производится как для кусочно-линейной, так и для непрерывной аппроксимации приведенного продольного профиля горки с использованием операционного метода.

**При кусочно-линейной аппроксимации**  $F(s)$  выражается через уклоны спрямленного продольного профиля при помощи единичных функций. В результате решения уравнений скатывания получены следующие расчетные формулы для определения скорости отцепа в точке с координатой  $s$ .

а) для одиночного отцепа:

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2 q' \left\{ i_1 s + \sum_{j=1}^{n-1} (i_{j+1} - i_j) (s - s_j) \right\} \sigma_0 (s - s_j) - \sum_{k=1}^m \gamma_{тк} (s - s_k) [\sigma_0 (s - s_k) - \sigma_0 (s - s_k - l_{тк})] - s \Sigma w 10^{-3}} \quad (5)$$

б) для однородного отцепа:

$$v = \sqrt{v_0^2 + \frac{q'}{l_0} \{ 2 l_0 (s - s_0) (i_1 - 10^{-3} \Sigma w) + \sum_{j=2}^n (i_j - i_{j-1}) \cdot [(s - s_{j-1})^2 \sigma_0 (s - s_{j-1}) - (s_0 - s_{j-1})^2 \sigma_0 (s_0 - s_{j-1}) + (s_0 - s_{j-1} - l_0)^2 \sigma_0 (s_0 - s_{j-1} - l_0) - (s - s_{j-1} - l_0)^2 \sigma_0 (s - s_{j-1} - l_0)] \} - 2 q' \sum_{k=1}^m \gamma_{тк} (s - s_k) [\sigma_0 (s - s_k) - \sigma_0 (s - s_k - l_{тк})]} \quad (6)$$

где, помимо ранее введенных обозначений,

$v_0$  — начальная скорость отцепа;

$i_1, \dots, i_{j-1}; i_j, i_{j+1}$  — уклоны соответственно первого,  $(j-1)$ -го,  $j$ -го и  $(j+1)$ -го участков профиля;

$s_0$  — координата начальной точки отсчета, в которой задана начальная скорость;

$\Sigma w$  — сумма основного удельного сопротивления движению отцепа и усредненного постоянного сопротивления воздушной среды.

Для неоднородного отцепа решение уравнения (1) при кусочно-линейной аппроксимации профиля принципиально возможно, однако в работе не приводится, т. к. расчетные формулы принимают чрезвычайно сложную структуру.

В приведенных формулах (5) и (6) единичные функции  $\sigma_0 (s)$  фактически являются средством проверки необходимости включения в решение соответствующих членов уравнения. Поэтому формулы (5) и (6) при массовых расчетах могут быть реализованы на цифровых вычислительных машинах и на машинах — аналогах при релейном переключении участков решения

При непрерывной аппроксимации приведенного продольного профиля полиномом четвертой степени функция  $F(s)$  для всех типов отцепов выражается полиномом третьей степени вида:

$$F(s) = \sum_{q=0}^3 b_q s^q \quad (7)$$

Решение уравнения (1) для всех типов отцепов приводит в этом случае к следующей расчетной формуле.

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2 q' \left[ \sum_{q=0}^3 \frac{b_q}{q+1} (s^{q+1} - s_0^{q+1}) - 10^{-3} (s - s_0) \Sigma w \right]} \quad (8)$$

В формулах (7) и (8) тип отцепа влияет только на коэффициенты полинома  $b_q$  которые однозначно определяются в зависимости от характеристик отцепа и коэффициентов полинома четвертой степени  $a_q$

а) для одиночного вагона:

$$b_0 = a_1; \quad b_1 = 2 a_2; \quad b_2 = 3 a_3; \quad b_3 = 4 a_4 \quad (9)$$

б) для однородного отцепа:

$$\begin{aligned} b_0 &= a_1 - a_2 l_0 + a_3 l_0^2 - a_4 l_0^3 \\ b_1 &= 2 a_2 - 3 a_3 l_0 + 4 a_4 l_0^2 \\ b_2 &= 3 a_3 - 6 a_4 l_0 \\ b_3 &= 4 a_4 \end{aligned} \quad (10)$$

в) для неоднородного отцепа:

$$\begin{aligned} b_0 &= a_1 - 2 a_2 \sum_{z=1}^r \gamma_z l_z + 3 a_3 \sum_{z=1}^r \gamma_z l_z^2 - 4 a_4 \sum_{z=1}^r \gamma_z l_z^3 \\ b_1 &= 2 a_2 - 6 a_3 \sum_{z=1}^r \gamma_z l_z + 12 a_4 \sum_{z=1}^r \gamma_z l_z^2 \\ b_2 &= 3 a_3 - 12 a_4 \sum_{z=1}^r \gamma_z l_z \\ b_3 &= 4 a_4 \end{aligned} \quad (11)$$

Произведенные расчеты показали, что формулы (9) и (10) являются частными случаями общих формул (11).

Таким образом, непрерывная аппроксимация продольного профиля сортировочной горки позволяет получить абсолютно идентичные дифференциальные уравнения и формулы для расчета скорости скатывания, справедливые для всех типов отцепов.

В главе приведены также формулы для расчета координат точки отрыва отцепов, полученные в результате решения уравнения (1) при равенстве нулю его правой части в случае кусочно-линейной и непрерывной аппроксимации профиля горки.

#### IV. Машинное решение дифференциальных уравнений скатывания отцепов с сортировочной горки

В главе излагается методика решения обобщенных дифференциальных уравнений движения на типовых машинах-аналогах. Машинное решение уравнений, в отличие от их приближенного аналитического решения, производится с учетом переменного сопротивления воздушной среды.

Рассматривается два способа решения при независимой переменной  $t$  (время) и независимой переменной  $s$  (путь). При первом способе решения машинные уравнения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= A_1 x_2 \\ x_2 &= A_2 [F_1(x_1) \mp C (x_2 \pm x_{2n})^2] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $x_1$  — машинная переменная, моделирующая путь, пройденный отцепом;

$x_2$  — машинная переменная, моделирующая, скорость отцепа;

$x_{2n}$  — постоянное напряжение — аналог скорости ветра;

$A_1$ ;  $A_2$ ;  $C$  — машинные коэффициенты.

При втором способе решения машинные уравнения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} x_1' &= A_1 [F_1(\tau) \mp C (\sqrt{x_1} \pm x_{1n})^2] \\ x_2' &= A_2 \frac{1}{\sqrt{x_1}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где  $x_1$  — машинная переменная, моделирующая квадрат скорости отцепа;

$\tau$  — машинное время, моделирующее путь, проходимый отцепом;

$x_2$  — машинная переменная, моделирующая физическое время движения отцепа;

$A_1$ ;  $A_3$ ;  $C$  — машинные коэффициенты;

$x_v$  — постоянное напряжение — аналог скорости ветра.

Машинное решение по обоим способам производится при непрерывной аппроксимации приведенного продольного профиля. Поэтому в уравнениях (12) и (13) функции  $F_1(x_1)$  и  $F_1(\tau)$  получены путем соответствующих преобразований полинома третьей степени. Для удобства машинного решения в них включены также члены, моделирующие действие тормозных позиций.

Оба способа решения позволяют автоматически определять точку отрыва отцепа, а первый способ, кроме того, производить также и обратное решение задачи — нахождение скорости в начале участка скатывания по известной скорости в его конце.

Для оценки точности машинного решения произведено сравнение его результатов с:

а) аналитическим решением для контрольной задачи;

б) экспериментальными кривыми  $v(s; t)$ , полученными на действующей сортировочной горке с использованием методики и измерительной аппаратуры, описанных в разделе III;

в) графическим интегрированием по методу к. т. н. Ю. А. Муха, произведенным при исходных данных, установленных на основании обработки тех же опытных кривых  $v(s; t)$ .

В результате произведенного сравнения установлено:

1) Первый способ машинного решения обеспечивает более высокую точность. Максимальная ошибка по сравнению с контрольной задачей характерна для начальной точки скатывания и составляет всего 2,7%, на остальном пути скатывания она снижается до  $0,3 \div 0,7\%$ .

2) Для одиночных вагонов наибольшее отклонение результатов машинного решения от опытных данных имеет место в начале I и II тормозных позиций и составляет около 10%.

В остальных точках пути скатывания несовпадение результатов машинного решения с опытами значительно снижается.

3) Соответственно снижается это несовпадение по мере увеличения длины отцепа и, в частности, для двухвагонного отцепа не превышает 3%.

4) Относительные ошибки машинного решения по сравнению с опытными данными несколько превышают соответствующие ошибки графического решения в пределах участка скатыва-

ния до II тормозной позиции и становятся меньше их за II тормозной позицией.

Увеличение длины отцепа приводит к сближению результатов машинного и графического решения.

Разработанная в этой главе методика машинного решения дифференциальных уравнений скатывания может быть использована в системах АРС для расчета параметров регулирования, также при массовых расчетах, связанных с проектированием сортировочных горок и исследованием их работы.

## Р А З Д Е Л II.

### УПРАВЛЕНИЕ РОСПУСКОМ СОСТАВОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

Основной целью регулирования скорости скатывания отцепов на сортировочной горке является обеспечение высокой перерабатывающей способности и безопасности их работы. С этой точки зрения главным эксплуатационным показателем, определяющим оптимальность принятой системы регулирования на сортировочной горке, является достигаемая при этом максимальная скорость роспуска составов.

При сравнении систем автоматического управления этот показатель должен включаться в состав их комплексной технико-экономической оценки, определяя собой экономию эксплуатационных расходов, связанную с повышением темпа расформирования.

Отсюда вытекает следующий принцип, положенный в основу дальнейшего исследования:

Процесс автоматического регулирования скорости скатывания отцепов рассматривается, как составная часть управления всем процессом роспуска. Система АРС является частью системы автоматического управления роспуском, а отдельные автоматические регуляторы, управляющие работой каждой тормозной позиции, в комплексе с телеуправлением горочным локомотивом должны осуществлять регулирование каждого элемента этого процесса в соответствии с взаимовязанными алгоритмами, обеспечивающими, в конечном счете, оптимальность всего процесса в целом.

Исходя из этого положения во II разделе рассматриваются условия и алгоритмы оптимального (по быстрдействию) управления роспуском составов в конкретном применении к сортиро-

вочным горкам, оборудованным двумя тормозными позициями на спускной части и парковыми тормозными позициями любого типа (в том числе и осаживателями на сортировочных путях).

## **V. Основные принципы регулирования скорости скатывания отцепов на сортировочных горках**

В главе произведен анализ способов регулирования скорости отцепов на сортировочных горках. На основе литературных источников и конкретных экспериментальных данных, полученных при проведении опытов на одной из сортировочных горок, показано, что прицельное регулирование может практически осуществляться на одной парковой тормозной позиции. Установлено, что задача интервального регулирования должна решаться комплексно при помощи соответствующего торможения отцепов и изменения скорости роспуска составов с учетом прицельной дальности скатывания.

На основе обзора режимов интервального регулирования, применяемых в настоящее время или рекомендованных к применению в отечественных и зарубежных системах АРС, установлено, что все они в большей или меньшей мере решают поставленную задачу, исходя из требований получить минимальный диф в точке разделения отцепов и на тормозных позициях.

При этом режим регулирования выбирается по условию скатывания неблагоприятного сочетания отцепов с целью обеспечить для этого и, следовательно, для любого другого случая расчетную скорость расформирования состава.

Такой принцип по своему существу не предусматривает оптимальное решение для каждого состава в отдельности, а преследует лишь одну цель — обеспечить гарантированный темп расформирования всех составов, перерабатываемых на данной сортировочной горке.

## **VI. Оптимальное интервальное регулирование скорости скатывания отцепов с сортировочной горки**

Исходя из основных положений математической теории оптимальных процессов, можно утверждать, что для каждого расформируемого состава существует некоторый оптимальный режим роспуска, условия реализации которого могут быть практически определены.

При выборе режима интервального регулирования нулевой диф в точке разделения и на замедлителях не может служить критерием оптимальности.

Для подтверждения этого положения, ранее высказанного проф. А. М. Долаберидзе, произведен анализ условий скатывания наиболее неблагоприятного сочетания П-Х-П (плохой бегун, за ним хороший и за ним опять плохой). На основании этого анализа установлено, что торможение хорошего бегуна с целью получения минимального дифа для первой пары приводит к ухудшению условий разделения второй пары отцепов.

Таким образом для трех и более последовательно скатывающихся отцепов режим интервального регулирования каждого из них не может выбираться изолированно, а должен подчиняться условиям скатывания всей последовательности отцепов.

Указанное положение нашло свое отражение в сформулированном в этой главе **первом условии** оптимального интервального регулирования:

**Оптимальность режима интервального регулирования каждого отцепа в отпускаемом составе определяется оптимальными условиями скатывания всей последовательности взаимосвязанных отцепов, в которую он входит.**

Границы взаимосвязанной последовательности отцепов устанавливаются **вторым условием** оптимального интервального регулирования:

**Последовательность отцепов, взаимосвязанных по режиму интервального регулирования, ограничена отцепом, для которого время скатывания до стрелки разделения при управлении его движением по условиям интервального и прицельного регулирования, не превышает соответствующее время скатывания следующего отцепа при управлении его движением только по условиям прицельного регулирования (при полном использовании мощности третьей тормозной позиции).**

Третье условие оптимального интервального регулирования вытекает из сформулированного выше положения о том, что интервальное регулирование является составной частью оптимального управления процессом отпуска составов на сортировочной горке. Исходя из этого, а также основываясь на приведенном в работе анализе, **третье условие** гласит:

**Оптимальность режима интервального регулирования скорости для последовательности отцепов определяется соответствием минимальных интервалов на вершине горки, рассчитанных по условиям их скатывания и отрыва от расформируемого состава.**

Исходя из сформулированных выше условий скорости выхода из тормозных позиций каждого из отцепов, входящих в последовательность, при расчете оптимального режима интервального

регулирования должны определяться путем совместного решения системы  $g-1$  уравнений, где  $g$  — количество отцепов в последовательности.

По полученной расчетной схеме разработан алгоритм, блок-схема которого приведена в главе.

Однако практическое применение этого алгоритма затрудняется тем, что для его реализации необходимо иметь данные о ходовых свойствах отцепов, входящих в последовательность, до начала их скатывания, что при современном уровне развития горочной техники сделать нельзя.

Поэтому в работе намечены два этапа разработки и внедрения систем оптимального управления на сортировочных горках:

**I этап:** Управление роспуском составов при применении на спускной части горки одного из принятых в настоящее время упрощенных режимов интервального регулирования скорости скатывания отцепов.

На этом этапе достигается **условный оптимум** в том смысле, что управление процессом роспуска будет оптимальным только для условий, обеспечиваемых принятым режимом интервального регулирования.

**II этап.** Оптимальное управление роспуском составов при применении алгоритма оптимального интервального регулирования.

Первый этап сравнительно легко, без сложных переустройств накладывается на сортировочные горки, оборудованные современными системами АРС, а второй этап является дальнейшим развитием первого.

## **VII. Управление роспуском составов на горках при упрощенных режимах интервального регулирования (условный оптимум)**

Разработанный в этой главе алгоритм управления роспуском составов основан на том, что скорость расформирования для каждой конкретной группы отцепов должна определяться индивидуально, исходя из условий ее прохода по ограничивающим элементам сортировочной горки. Отсюда вытекает последовательность действий, необходимых для решения поставленной задачи:

1) Для каждого отцепа в составе определяются скорости его прохода по тормозным позициям и стрелкам разделения с учетом режимов торможения, принятых в данной системе АРС.

При этом для всех отцепов принимается постоянная начальная скорость  $v'_0$ , установленная для данной горки по условиям скатывания наиболее неблагоприятного сочетания отцепов.

2) На основании полученных результатов для каждой пары отцепов находится лимитирующий элемент на спускной части горки. В основу этого расчета положено определение резервного времени, которое образуется на каждом элементе при скорости роспуска  $v'_0$ , и соответствующего этому времени сокращенного начального интервала на вершине горки.

3) Для каждого отцепа определяются максимальные допустимые скорости, при которых обеспечивается разделение отцепов на лимитирующих элементах.

Расчет ведется путем решения системы рекуррентных уравнений, учитывающих изменение времени скатывания отцепов при увеличении их начальной скорости.

4) Полученные в результате произведенного расчета максимальные скорости роспуска для каждого отцепа проверяются:

а) по условиям входа на замедлители и достаточности мощности тормозных позиций;

б) по тяговым и тормозным характеристикам горочного локомотива.

На основании изложенной последовательности расчета разработан соответствующий алгоритм, который состоит из четырех частей.

**I часть** — моделирование скатывания отцепов расформируемого состава при принятых режимах торможения и расчетной скорости роспуска  $v'_0$ .

Эта часть алгоритма разработана в конкретном применении к сортировочным горкам, оборудованным устройствами АРС ЦНИИ и АРС ГГСС.

**II часть** — выявление лимитирующих элементов на спускной части горки.

**III часть** — расчет скоростей роспуска, максимально допустимых по условиям скатывания отцепов.

**IV часть** — проверка режима роспуска по тяговым и тормозным характеристикам горочного локомотива.

При реализации IV части алгоритма учитываются переменный вес состава и переменный уклон пути надвига.

В главе приведены структурные схемы и описание алгоритмов, а также примеры их применения на сортировочных горках, оборудованных устройствами АРС ЦНИИ и АРС ГГСС.

В результате расчетов установлено:

а) максимальная постоянная скорость роспуска расчетного состава равна 2—2,2 м/сек.;

б) средняя скорость роспуска расчетного состава (при переменной скорости) равна 2,5—2,7 м/сек.

Таким образом на конкретных примерах показано, что условный оптимум обеспечивает достаточно высокий темп роспуска составов.

### **VIII. Методика технико-эксплуатационной оценки алгоритмов управления роспуском составов**

Произведенные исследования показали, что принятый в настоящее время метод расчета скорости расформирования по условиям скатывания наиболее неблагоприятного сочетания отцепов не может быть использован для технико-эксплуатационной оценки алгоритмов управления роспуском составов, так как:

а) рассчитан на наиболее тяжелые и маловероятные условия работы сортировочной горки;

б) не позволяет учесть взаимосвязь в процессах регулирования последовательно скатывающихся отцепов;

в) не отражает режима переменной скорости роспуска, который используется в алгоритмах управления.

Кроме того, перерабатывающая способность сортировочной горки, установленная по скорости роспуска, найденной для неблагоприятного сочетания отцепов, не является максимальной. В реальных условиях при любых других комбинациях отцепов может быть достигнута большая скорость роспуска и, следовательно, более высокое значение перерабатывающей способности.

Расчетные скорости роспуска и соответствующая им перерабатывающая способность должны учитывать специфику анализируемого алгоритма управления и отвечать действительным условиям работы сортировочной горки. В связи с этим скорости расформирования должны устанавливаться для так называемого расчетного состава, разложение которого соответствует конкретному вагонопотоку, поступающему в переработку на данную сортировочную горку, и имеет наиболее вероятную количественную (длина состава и отдельных входящих в него отцепов) и качественную (размещение в составе отцепов по назначениям и ходовым свойствам) характеристики.

В главе, на основании статистического анализа вагонопотоков конкретных сортировочных горок, показано, что параметры,

влияющие на разложение расчетного состава, распределяются по нормальному закону

Это положение позволило разработать методику набора расчетного состава, базирующуюся на статистическом анализе фактических вагонопотоков сортировочной горки. В соответствии с рекомендуемой методикой набор расчетного состава производится на основе:

а) вероятностей следования очередного отцепа на соответствующие пути сортировочного парка с учетом возможных повторений одних и тех же назначений в составе;

б) вероятностей следования очередного отцепа на соответствующие пути сортировочного парка при условии, что назначение отцепа, стоящего впереди, известно.

Предлагаемая методика практически реализуется в виде табличного расчета и показана на конкретном примере.

Кроме того в главе разработаны вероятностные методы определения распределения отцепов в составе по их ходовым качествам и длине, а также определения расчетного заполнения путей сортировочного парка.

### Р А З Д Е Л III.

#### **ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА И МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ**

В разделе излагаются особенности методики комплексных экспериментальных исследований на сортировочных горках, основанной на:

а) непрерывном измерении и фиксации скорости движения отцепов с помощью телеизмерительной аппаратуры, разработанной автором и изготовленной под его руководством на кафедре «Станции и узлы» ДИИТа;

б) синхронной фиксации всех измеряемых величин, характеризующих исследуемый процесс.

Описанная в разделе аппаратура и методика использованы в настоящей работе в разделе I — для опытной оценки точности машинного интегрирования уравнений скатывания отцепов и в разделе IV — для получения экспериментальных статических и динамических характеристик замедлителей и других элементов автоматических регуляторов в системах АРС.

## **IX. Телеизмерительная аппаратура ТМ-56**

В главе приведен краткий обзор основных методов измерений, применяемых на сортировочных горках, и показано, что использование телеизмерительной аппаратуры ТМ-56 дает возможность исследовать характер изменения скорости отцепов не только на участках свободного скатывания, но также и в пределах зон торможения замедлителями и башмаками, а также в тех точках пути скатывания, положение которых заранее нельзя определить.

Аппаратура ТМ-56 состоит из двух частей: подвижного датчика, устанавливаемого на отцепе, скорость которого измеряется, и стационарного приемника. Телесвязь между датчиками и приемником осуществляется по радиоканалу. Передача информации о скорости движения отцепа и пройденном им пути производится с использованием частотно-импульсной модуляции несущего радиосигнала, который в приемнике преобразуется и управляет работой двух счетных каналов — скорости и пути. Выход обоих каналов подключается к магнитоэлектрическому осциллографу, по ленте которого прочерчивается непрерывная кривая скорости и фиксируются через определенный интервал отметки пути, пройденного вагоном.

Кроме того, аппаратура ТМ-56 может быть использована для дискретного измерения скорости отцепа в отдельных точках спускной части горки.

Помимо изложения принципов работы аппаратуры ТМ-56, в главе дано описание ее конструкции и приведены основные принципиальные схемы.

## **X. Методика проведения комплексных экспериментальных исследований на сортировочных горках и обработки их результатов**

Методика комплексных экспериментальных исследований разработана с учетом использования в качестве основного измерительного прибора аппаратуры ТМ-56.

Кроме того, в зависимости от цели экспериментальных исследований, в них могут быть использованы следующие датчики:

1) Путевые педали для фиксации пути и управления работой осциллографа.

Путевые педали предназначены для получения на осциллограммах отметок осей отцепа при прохождении им отдельных характерных точек пути скатывания. Отметки осей необходимы для облегчения расцифровки осциллограмм.

В ряде случаев путевые педали могут включаться через специальные коммутаторы, схемы которых разработаны автором и приведены в главе.

2) Тензометрические датчики для измерения давления воздуха в цилиндрах замедлителей и перемещения их тормозных балок.

3) Датчики измерения скорости и направления ветра.

Информация от всех перечисленных датчиков фиксируется магнитоэлектрическим осциллографом одновременно с кривой  $v(t; s)$  движения отцепа. Кроме того, на осциллограмме может фиксироваться также и ряд других процессов, связанных с работой систем АРС.

Методика обработки осциллограмм для всех процессов, регистрируемых в виде непрерывных кривых, основана на принципе сопоставления ординат опытной и тарировочной кривых, что позволяет существенно повысить точность измерений.

## **XI. Оценка точности измерений скорости скатывания отцепов при помощи телеизмерительной аппаратуры ТМ-56**

Фактическая скорость скатывания отцепов является одним из важнейших видов информации, получаемых при проведении комплексных экспериментальных исследований на сортировочных горках. Поэтому, оценка точности ее измерения имеет принципиальное значение.

В главе рассматриваются основные теоретические принципы работы измерительного канала скорости.

На основе гармонического анализа комплекса, состоящего из цепей РС измерительного канала скорости и вибратора осциллографа, установлено, что суммарная относительная ошибка измерения, при прочих равных условиях зависит от:

- а) собственной частоты колебаний вибратора;
- б) частоты тарировочного сигнала;
- в) значения измеряемой скорости движения отцепа.

При использовании высокой тарировочной частоты и вибратора средней инерционности наибольшая относительная ошибка измерения скорости не превышает 5,5% при скоростях порядка 0,5 м/сек и 1,5% при скоростях 1 м сек. и выше.

## РАЗДЕЛ IV

### ДИНАМИКА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ОТЦЕПОВ В СИСТЕМАХ АРС

При практической реализации разработанных алгоритмов управления роспуском оптимальность достигнутых результатов определяется не только правильностью и рациональностью задания, установленного для каждой тормозной позиции при проходе по ней очередного отцепа, но также и тем, с какой точностью это задание будет выполнено.

В соответствии с этим положением в разделе произведено исследование точности регулирования скорости отцепов в системах АРС с точки зрения влияния на нее параметров всех основных элементов регуляторов, участвующих в реализации заданной скорости выпуска отцепов из тормозной позиции.

Так как управление работой замедлителей в системах АРС осуществляется автоматически, то поставленная задача сводится к исследованию динамических ошибок регулирования на основе анализа динамики работы автоматических регуляторов.

#### **XII. Структурные схемы автоматических регуляторов в системах АРС**

Автоматическим регулятором в системах АРС на сортировочных горках следует считать комплекс устройств, обеспечивающих в пределах данной тормозной позиции выход отцепов с определенной заданной скоростью. Так как по маршруту скатывания отцепов на современных горках имеется 2—3 тормозных позиции, то автоматические регуляторы каждой из них работают во взаимной увязке, образуя единую для данной горки систему автоматического регулирования скорости с взаимосвязанными датчиками.

Специфика горочных устройств вносит в работу автоматических регуляторов ряд существенных особенностей:

- а) ограниченная длина зоны регулирования, зависящая от длины тормозной позиции и тормозимого отцепа;
- б) двухпозиционное или ступенчатое (с ограниченным количеством ступеней) регулирование;
- в) возможность активного воздействия только на полужительное рассогласование.

Анализ схем автоматических регуляторов отечественных и зарубежных систем показал, что их основной составной частью всегда является замкнутый контур следящего релейного регулирования, в состав которого входят:

- а) электронный измеритель скорости (чувствительный элемент);
- б) блок сравнения (сумматор и релейный элемент);
- в) пневмопривод замедлителя (усилительно-преобразовательный элемент);
- г) собственный замедлитель (исполнительный элемент).

Помимо основного контура в состав автоматического регулятора могут входить в различных комбинациях ряд корректирующих цепей, осуществляющих добавочные обратные связи и предназначенных для улучшения качества работы регулятора и всей системы АРС в целом.

### **ХIII. Статические характеристики клещевидных замедлителей типа 50, как исполнительных элементов автоматических регуляторов в системах АРС**

В соответствии с кинематической схемой клещевидного замедлителя типа 50 он рассматривается, как нелинейное звено с зоной нечувствительности.

Его статическая характеристика, выражающая зависимость тормозной характеристики  $X_T$  от давления  $P$  воздуха в тормозных цилиндрах, состоит из двух частей:

- а) зоны нечувствительности, для которой  $X_T = 0$  при изменении величины давления от 0 до  $P_1$ ;
- б) нелинейной зоны  $X_T(P)$  при  $P > P_1$ .

Границы зоны нечувствительности установлены расчетным путем на основании решения уравнений статического равновесия сил, действующих на поршни и тормозные цилиндры, и проверены по экспериментальным данным.

Расчеты показывают, что зоны нечувствительности замедлителя при его включении и выключении не совпадают и, соответственно, его статическая характеристика имеет петлю гистерезиса. Однако, в связи с небольшим значением этого несовпадения, гистерезисом практически можно пренебречь.

Характеристика нелинейной зоны  $X_T(P)$  установлена экспериментальным путем на основе исследований, выполненных в 1960 г на Южной сортировочной горке ст. Основа Южной ж. д. с использованием измерительной аппаратуры и методики, описанной в разделе III.

В главе приведено краткое описание организации экспериментальных исследований, а также показана методика обработки их результатов.

Статистический анализ экспериментальных данных показывает, что нелинейная зона характеристики описывается уравнением:

$$X_T = A P^m + C \quad (14)$$

где  $X_T$  — среднее значение тормозной характеристики одного замедлителя типа 50;

$P$  — давление воздуха в тормозных цилиндрах (в ати);

$A$ ,  $C$  и  $m$  — параметры уравнения, установленные на основании обработки экспериментальных данных.

В главе приведены расчетные значения параметров  $A$ ,  $C$  и  $m$  для порожних и груженных 4-х и 6-ти осных вагонов, а также показана методика их пересчета для отцепов, состоящих из нескольких вагонов.

#### **XIV. Статическая характеристика клещевидно-весовых замедлителей, как исполнительных элементов автоматических регуляторов в системах APC**

Анализ кинематической схемы клещевидно-весовых замедлителей позволяет констатировать, что они также, как и клещевидные замедлители, являются нелинейным звеном с зоной нечувствительности.

Однако в отличие от замедлителей типа 50, их статическая характеристика в циклах включения и выключения состоит из трех частей:

- а) зоны нечувствительности;
- б) нелинейного участка нарастания тормозной характеристики;
- в) участка, для которого тормозная характеристика постоянна и не зависит от давления воздуха в тормозных цилиндрах.

Численные значения параметров, характеризующих статическую характеристику клещевидно-весовых замедлителей, установлены экспериментальным путем при проведении комплексных экспериментальных испытаний замедлителей типа КВ-1-59, КВ-3-59, КВ-3-59м и КВ-3-62 на станции Ленинград-Сортировочный-Московский Октябрьской ж. д. в 1961 — 64 гг.

В главе приводится краткое описание организации и методики этих испытаний, основанных на принципах, изложенных в разделе III. Статистическая обработка результатов испытаний позволила установить:

а) значения давлений воздуха в тормозных цилиндрах замедлителей, ограничивающие зону нечувствительности статической характеристики при их включении и выключении;

б) тормозную мощность замедлителей, характеризующую третий участок статической характеристики.

Учитывая большую практическую важность экспериментальных значений тормозной мощности замедлителей, для них произведена полная статистическая обработка. В результате показано, что экспериментальные значения тормозной мощности распределяются по нормальному закону

Для получения второго участка статической характеристики клещевидно-весовых замедлителей, исходя из их кинематической схемы, использованы экспериментальные данные, установленные в главе XIII для замедлителя типа 50, при чем эти данные пересчитаны с учетом конкретных особенностей и размеров клещевидно-весовых замедлителей.

Так как для клещевидно-весовых замедлителей, в отличие от замедлителей типа 50, зоны нечувствительности в цикле включения и выключения не совпадают, то их статическая характеристика имеет явно выраженную петлю гистерезиса.

В главе приводятся конкретные статические характеристики для замедлителей типа КВ при торможении различных отцепов.

## **XV. Динамические (переходные) характеристики элементов автоматических регуляторов в системах АРС**

В главе рассматриваются переходные режимы основных звеньев автоматических регуляторов систем АРС и, в частности, системы пневмопривод-замедлитель и локационного измерителя скорости.

Для получения динамической характеристики пневмопривода использована следующая методика:

а) вывод уравнений, описывающих динамику работы пневмопривода, на основе электро-пневматических аналогий;

б) расчет параметров этих уравнений на основе экспериментальных данных, полученных в опытах на ст. Ленинград-Сортировочный-Московский, ссылка на которые дана в предыдущей главе XIV. При этом параметры пневмопривода определяются с учетом совместной работы с замедлителем.

Процессы, протекающие в пневмоприводе в течение циклов включения и выключения замедлителя в соответствии с кинематикой его работы, разбиваются на шесть периодов. I, III, IV, VI периоды протекают при постоянных объемах рабочих полостей цилиндров, а II и V — при изменении этих объемов. Кроме того, I и IV периодам предшествует время постоянного запаздывания звена, величина которого также установлена экспериментальным путем.

Использование указанной выше методики позволило описать работу пневмопривода в I, III, IV и VI периодах дифференциальными уравнениями первого порядка с постоянными коэффициентами, а в II и V периодах — дифференциальными уравнениями первого порядка с переменными коэффициентами.

Решение уравнения дает аппроксимацию кривых  $P(t)$  в I, III, IV и VI периодах экспонентами, а во II и V периодах — степенными функциями. При таком способе аппроксимации пневмопривод может рассматриваться, как инерционное звено с постоянным запаздыванием, переменными постоянной времени и коэффициентом усиления.

В главе произведен анализ совпадения теоретических и экспериментальных кривых  $P(t)$  и показано, что, при условии экспериментального определения параметров звена, ошибки аппроксимации весьма незначительны (по всем точкам до 5% и только в одной точке — 12%).

В дальнейшем, с целью упрощения машинного решения уравнений, описывающих динамику работы пневмоприводов, произведена линеаризация кривых  $P(t)$  для II и V периодов. Соответствующий расчет показал, что замена степенных функций прямыми практически почти не отражается на точности аппроксимации.

На основе совместного рассмотрения динамической характеристики пневмопривода и статистической характеристики клещевидно-весового замедлителя получена динамическая характеристика системы пневмопривод-замедлитель.

Анализ этой характеристики позволил получить формулы для расчета времени включения замедлителя типа КВ и показать, что время его полного включения не является постоянной величиной, а зависит от веса тормозимого отцепа.

По результатам экспериментальных исследований установлено также, что электронный измеритель скорости является инерционным звеном и его динамика описывается дифференциальным уравнением первого порядка.

## **XVI. Структурное моделирование автоматических регуляторов системы АРС на электронной вычислительной машине непрерывного действия**

Исследование переходных процессов в звеньях основного контура автоматических регуляторов системы АРС показывает, что регулятор состоит из двух основных частей:

а) линейной части, описываемой дифференциальным уравнением первого порядка;

б) нелинейной части, состоящей из трех нелинейных звеньев, в том числе одного релейного типа.

Для исследования динамики такой системы наиболее удобно применить метод структурного моделирования, т. к. он позволяет сравнительно просто учесть все нелинейности. Кроме того, использование вычислительных машин, в отличие от других методов, позволяет в процессе решения задачи легко изменять значения параметров отдельных звеньев с целью исследования их влияния на работу регулятора.

В главе на основе анализа уравнений, описывающих работу каждого звена регулятора, получены соответствующие им машинные уравнения, а также рассчитаны масштабные коэффициенты и электрические параметры структурной схемы машинного решения.

## **XVII. Исследование динамических ошибок регулирования на вычислительной машине МН-7**

Произведенные в предыдущих главах исследования позволили установить, что с учетом некоторых допустимых упрощений динамика работы автоматического регулятора системы АРС описывается системой трех дифференциальных уравнений первого порядка (в том числе одного нелинейного) и двух нелинейных функций (в том числе одной релейного типа). Качественный анализ переходных процессов, протекающих в регуляторе, а также экспериментальные данные, полученные на сортировочных горках, оборудованных устройствами АРС ЦНИИ и АРС ГТСС, позволяют констатировать, что при расположении тормозной позиции на ускоряющем уклоне и изменении знака ускорения при торможении отцепа в процессе регулирования его скорости, автоматический регулятор попадает в устойчивый периодический режим автоколебаний. При торможении коротких отцепов на любом профиле, а также длинных отцепов на неускоряющем уклоне практически имеет место только одно перерегулирова-

ние, которое может рассматриваться, как часть первого периода автоколебаний. Следовательно **автоколебания, независимо от их длительности, являются основным источником динамических ошибок регулирования.**

Исследования, выполненные на машине, показали, что амплитуды автоколебаний скорости отцепя при прочих равных условиях зависят от его ускорения при торможении и свободном скатывании по тормозной позиции.

При этом знак амплитуды зависит от знака ускорения, а значение перерегулирования от величины ускорения и, следовательно, от уклона продольного профиля зоны регулирования и состава отцепя.

Увеличение постоянной времени скоростемера, зоны гистерезиса релейного элемента, постоянного запаздывания и постоянной времени системы пневмопривод-замедлитель неизбежно приводит к увеличению амплитуды автоколебаний. Сокращение времени включения замедлителя оказывает значительно большее влияние на величину положительного перерегулирования, чем соответствующее сокращение времени выключения — на отрицательное перерегулирование.

При этом установлено, что снижение влияния гистерезиса релейного элемента блока сравнения на точность регулирования может быть достигнуто за счет увеличения масштаба скорости отцепя в цепи обратной связи.

Значение конечной динамической ошибки регулятора, которая является следствием ограниченности длины зоны регулирования, зависит от очень большого количества факторов, характеризующих условия торможения каждого отцепя. Так как в практических условиях весьма сложно обеспечить режим торможения, полностью ликвидирующий конечную динамическую ошибку, то основным путем ее снижения является повышение частоты и уменьшение амплитуды автоколебаний.

Для этой цели предлагается схема регулятора с добавочной цепью обратной связи по ускорению, при чем для равномерного снижения положительных и отрицательных амплитуд глубина обратной связи при переключениях замедлителя должна изменяться.

В главе ,на основе машинного решения, получен ряд графиков, характеризующих зависимость динамических ошибок регулирования от параметров регулятора и тормозимого отцепя.

## XVIII. Основные выводы и предложения

1. Дифференциальное уравнение скатывания вагонов с сортировочной горки может быть записано в общем виде, не зависимо от характеристики скатывающегося отцепа и способа аппроксимации продольного профиля.

Указанные два фактора влияют только на структуру функции  $F(s)$ , которая входит в правую часть уравнения скатывания и выражает действие силы тяжести отцепа.

Полученные дифференциальные уравнения, обобщенные для различных типов отцепов, являются массовыми алгоритмами, определяющими порядок машинной переработки информации в системах АРС.

2. Наряду с общепринятой кусочно-линейной аппроксимацией продольного профиля сортировочных горок возможна его непрерывная аппроксимация. При этом функция  $F(s)$  в обобщенных дифференциальных уравнениях скатывания отцепов также становится непрерывной и гладкой в замкнутой области аппроксимации. Это положение облегчает решение дифференциальных уравнений, особенно для отцепов разной длины и разного состава по роду и осности вагонов.

Особое значение непрерывная аппроксимация имеет при решении уравнений на машинах непрерывного действия, в том числе в системах АРС.

3. При кусочно-линейной аппроксимации продольного профиля сортировочной горки функция  $F(s)$  для одиночного вагона и однородного отцепа наиболее удобно выражается через единичные функции. В таком же виде она входит в аналитическое приближенное решение дифференциального уравнения, которое может быть использовано для расчета скорости отцепов в любой точке горки.

Аналогичное решение дифференциального уравнения скатывания неоднородного отцепа при кусочно-линейной аппроксимации продольного профиля принципиально возможно, однако, в силу своей сложности, нерационально.

При непрерывной аппроксимации продольного профиля сортировочной горки полиномом четвертой степени функция  $F(s)$  для всех категорий отцепов выражается полиномом третьей степени. При прочих равных условиях коэффициенты полинома зависят только от типа отцепа и однозначно определяются расчетным путем.

Таким образом непрерывная аппроксимация продольного профиля обеспечивает структурное единообразие дифференциальных уравнений скатывания и их решения для всех категорий отцепов, что весьма важно при машинной переработке информации в системах АРС.

4. Решение дифференциальных уравнений скатывания, обобщенных для отцепов разной длины и типа, может быть реализовано без приближений на типовых электронных машинах-аналогах.

Разработанная методика машинного решения дифференциальных уравнений скатывания предназначена для использования в системах АРС при расчете параметров регулирования, а также в массовых расчетах, связанных с проектированием сортировочных горок и исследованием их работы.

5. Сравнение I-го (при независимой переменной  $t$ ) и II-го (при независимой переменной  $s$ ) способов машинного решения показывает, что при прочих равных условиях I способ обеспечивает более высокую точность решения и поэтому должен быть рекомендован для практического использования. При этом установленно, что результаты машинного решения вполне удовлетворительно совпадают с экспериментальными кривыми скорости, полученными при помощи телеизмерительной аппаратуры ТМ-56.

6. В основу решения задачи оптимизации процесса роспуска составов в работе положен следующий принцип:

Режимы интервального регулирования скорости скатывания индивидуальны для каждого отцепа. Конечной целью, определяющей их оптимальность, должен быть максимально допустимый темп роспуска конкретных составов, который для каждого из них также индивидуален.

7. Режим оптимального интервального регулирования с целью получения наибольшего темпа роспуска составов устанавливается исходя из трех условий, определяющих взаимосвязь регулирования скорости скатывания последовательности отцепов.

Алгоритм расчета режима оптимального интервального регулирования скорости скатывания отцепов основан на совместном решении системы уравнений для определения скорости выпуска всех отцепов данной последовательности из тормозной позиции.

8. Произведенное исследование показало, что решение задачи оптимального интервального регулирования принципиально возможно на основе машинной реализации разработанного алгоритма.

Однако, отсутствие в настоящее время технических средств для получения надежной информации о ходовых свойствах отцепов до начала их свободного скатывания затрудняет практическое использование этого решения.

В связи с этим рекомендуется два этапа разработки и внедрения систем оптимального управления на сортировочных горках:

**I этап** — управление процессом роспуска составов при применении на спускной части горки одного из принятых в настоящее время упрощенных режимов интервального регулирования скорости скатывания отцепов (условный оптимум).

**II этап** — оптимальное управление процессом роспуска составов при применении алгоритма оптимального интервального регулирования.

Реализация условного оптимума основана на использовании разработанного в настоящем исследовании алгоритма, который состоит из 4-х частей. Для обоих этапов обеспечивается их полная преемственность.

9. Эксплуатационный эффект от применения рекомендуемых алгоритмов устанавливается на основе определения времени роспуска расчетного состава с наиболее вероятным для конкретной горки сочетанием отцепов по назначениям, длине и ходовым качествам.

Полученное в результате соответствующего расчета время роспуска должно быть положено в основу определения экономии эксплуатационных расходов при технико-экономическом сравнении вариантов автоматизации сортировочной горки.

10. Основной составной частью всех автоматических регуляторов в системах АРС является замкнутый контур следящего релейного регулирования.

Автоматические регуляторы всех тормозных позиций по маршруту скатывания отцепа связаны между собой общим комплексом задатчиков, образуя единую систему автоматического регулирования скорости скатывания отцепов на сортировочной горке, являющуюся составной частью системы автоматического управления роспуском составов.

11. Статические и динамические характеристики отдельных звеньев автоматических регуляторов, необходимые для исследования их работы, установлены экспериментальным путем на основе комплексных измерений на ряде сортировочных горок сети дорог с применением специальной телеизмерительной аппаратуры ТМ-56, разработанной автором.

Использование телеизмерительной аппаратуры ТМ-56 совместно с другими напольными датчиками позволяет получить на ленте осциллографа синхронную запись всех процессов, характеризующих управляемое скатывание отцепов, и, в том числе, непрерывную кривую скорости отцепа.

12. Замедлители, как исполнительные элементы автоматических регуляторов в системах АРС, являются нелинейными звеньями. Статическая характеристика клещевидного замедлителя включает в себя два вида нелинейности:

- а) нелинейность типа зоны нечувствительности;
- б) нелинейность параболического типа.

Статическая характеристика клещевидно-весового замедлителя отличается от соответствующей характеристики клещевидного замедлителя наличием петли гистерезиса и участка, ограничивающего значение его максимальной тормозной характеристики.

Параметры статических характеристик замедлителей установлены на основе экспериментальных данных.

13. Пневмопривод замедлителей в переходных режимах работает, как нелинейное инерционное звено с постоянным запаздыванием и переменными постоянной времени и коэффициентом усиления.

Аппроксимация кривых  $P(t)$  экспонентами и степенными функциями, при экспериментальном определении постоянных времени, дает вполне удовлетворительную сходимость с опытами.

14. Динамическая характеристика системы пневмопривод-замедлитель, помимо использования при исследовании работы автоматического регулятора, позволяет установить время срабатывания замедлителя.

При включении клещевидно-весового замедлителя время его полного срабатывания зависит от веса тормозимого отцепа. Время выключения замедлителя является постоянной величиной.

15. Динамика работы автоматических регуляторов в системах АРС с учетом ряда упрощений, допустимость которых подтверждается экспериментальными данными, описывается системой трех дифференциальных уравнений (в т. ч. одного нелинейного) и двух нелинейных функций (в т. ч. одной релейного типа).

При расположении тормозной позиции на ускоряющем уклоне, и изменении знака ускорения при торможении отцепя в процессе регулирования его скорости, автоматический регулятор попадает в периодический режим автоколебаний, который является источником динамических ошибок регулирования.

16. Амплитуды автоколебаний скорости отцепя зависят от его ускорения при торможении и свободном скатывании по тормозной позиции. Знак амплитуды зависит от знака ускорения, а значение перерегулирования — от величины ускорения и, следовательно, от уклона продольного профиля зоны регулирования и состава отцепя.

Обеспечение точности работы регуляторов I тормозной позиции зависит в основном от положительного, а III тормозной позиции — от отрицательного перерегулирования. На точность работы II тормозной позиции в равной мере оказывает влияние, как положительное, так и отрицательное перерегулирование.

17 Увеличение постоянной времени скоростемера, зоны гистерезиса релейного элемента, постоянного запаздывания и постоянной времени системы пневмопривод-замедлитель неизбежно приводят к увеличению амплитуды автоколебаний.

Снижение влияния гистерезиса релейного элемента блока сравнения на точность регулирования достигается за счет повышения масштаба скорости отцепя в цепи обратной связи регулятора.

Основным способом снижения конечной динамической ошибки регулирования является повышение частоты и уменьшение амплитуды автоколебаний. Для этой цели в схему регулятора необходимо ввести цепь обратной связи по ускорению, обеспечивающую непрерывное упреждение заданной скорости выхода отцепя с тормозной позиции. Для равномерного снижения положительных и отрицательных амплитуд глубина обратной связи при переключении замедлителя должна изменяться.

Надежность работы регулятора обеспечивается, если для области положительных перерегулирований коэффициент обратной связи не превышает 0,75, а отрицательных — 0,5.

**Основные положения диссертации  
опубликованы в следующих работах:**

1. **Шафит Е. М.** — «Телеизмерения при скатывании вагонов с горки» Журнал «Железнодорожный транспорт», № 10, 1956.

2. **Шафит Е. М.** — «Телеизмерительная аппаратура для исследования процесса маневровой работы» Научные сообщения ДИИТа, № 4(8), г. Днепропетровск, 1958.

3. **Ющенко Н. Р., Шафит Е. М., Гурштейн И. И.** — «Прицельное торможение вагонов в сортировочном парке». Журнал «Железнодорожный транспорт», № 2, 1962.

4. **Ющенко Н. Р., Шафит Е. М.** — «Методика проведения экспериментальных наблюдений по исследованию режима скатывания вагонов с горки (с использованием телеизмерительной аппаратуры)» Труды ДИИТа, вып. 41, г. Днепропетровск, 1962.

5. **Шафит Е. М.** — «О точности измерений скорости скатывания отцепов с сортировочной горки при помощи телеизмерительной аппаратуры ТМ-56» Труды ДИИТа, вып. 41, г. Днепропетровск, 1962.

6. **Ющенко Н. Р., Шафит Е. М.** — «Сортировка шестиосных вагонов на горках и тормозные характеристики замедлителей» Журнал «Железнодорожный транспорт», № 5, 1963.

7. **Ющенко Н. Р., Шафит Е. М., Третьяк Б. А.** — «Технико-эксплуатационные характеристики клещевидно-весовых замедлителей КВ-3-59м» Труды ДИИТа, вып. 52. Транспорт М. 1965.

8. **Ющенко Н. Р., Шафит Е. М., Третьяк Б. А.** «Технико-эксплуатационные характеристики клещевидно-весовых замедлителей КВ-1-59» Труды ДИИТа, вып. 52. Транспорт М. 1965.

9. **Шафит Е. М.** — «Дифференциальные уравнения скатывания отцепов с сортировочной горки при различных способах аппроксимации продольного профиля» Труды ДИИТа, вып. 52, Транспорт М. 1965.

10. **Шафиг Е. М.** — «Аппроксимация продольного профиля сортировочных горэк» Труды ДИИТа, вып. 52, Транспорт М. 1965.

11. **Шафиг Е. М.** — «Машинное решение дифференциальных уравнений скатывания отцепов с сортировочной горки» Труды ДИИТа, вып. 52, Транспорт М. 1965

---

*Доцент, кандидат технических наук Е. М. ШАФИТ*

Теоретические основы автоматического управления  
ропуском составов на сортировочных горках

---

Сдано в набор 13/1-66 г. Подписано к печати 13/1-66 г.  
Бумага 60x90<sup>1/16</sup>, печ. л. 3. БТ 09014. Зак. № 336, тир. 200.

---

Никопольская гортипография, Днепропетровского областного  
управления по печати.  
г. Никополь, ул. К. Либкнехта, 40.

Сканировала Камянская Н.А.