

Н. К. МОДИН, кандидат технических наук, В. В. ВОЛЫНЕЦ, ассистент, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ СКАТЫВАЮЩИХСЯ С ГОРКИ ОТЦЕПОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОЙ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрена проблема автоматического регулирования скорости скатывающихся отцепов на сортировочной горке в условиях неопределенной информации об объектах управления. Приведены модели управления скоростью скатывающихся отцепов на основе алгоритмов прогнозирования средней величины интенсивности торможения и выбора величины упреждения по скорости на основе предварительно сформированных диаграмм интенсивности торможения вагонов в пределах тормозной позиции. Приведен алгоритм построения диаграммы интенсивности торможения для отцепов различных типов, в том числе и для тех, которые состоят из нескольких вагонов с различным количеством осей. Дано алгоритмическое решение для проверки адекватности выдвигаемого прогноза величин интенсивности торможения и упреждения по скорости с использованием односвязной логико-лингвистической модели на базе теории нечетких множеств.

Процесс автоматического регулирования скорости движущихся отцепов на сортировочной горке протекает в условиях значительной неопределенности информации как об объекте управления, так о параметрах исполнительных органов системы управления. Системы автоматического регулирования скорости (АРС) предусматривают использование в качестве исполнительных органов горочные вагонные замедлители (ГВЗ), а в качестве датчиков скорости – радиолокационные индикаторы скорости (РИС). Для осуществления прицельного торможения средствами парковой тормозной позиции система должна располагать информацией о параметрах тормозимого отцепа (весовая категория, количество вагонов, количество осей), а также данными о заданной скорости выхода отцепа из тормозной позиции  $v_3$ , интенсивности торможения (замедления движения отцепа)  $a_3$  и инерционности замедлителей на оттормаживание  $\Delta t$  (времени с момента подачи команды на оттормаживание до момента прекращения уменьшения скорости). По известным значениям  $a_3$  и  $\Delta t$  вычисляется величина упреждения по скорости  $\Delta v = a_3 \cdot \Delta t$ , которая позволяет компенсировать инерционность горочных замедлителей. Измеренная с помощью РИС фактическая скорость движения отцепа  $v_\phi$  сравнивается с суммой  $v_{\text{вых}} + \Delta v$ , и при достижении равенства  $v_\phi = v_3 + \Delta v$  система выдает команду на оттормаживание замедлителей.

В данной работе рассмотрен алгоритм прогнозирования средней величины интенсивности торможения  $a_{\text{пр}}$  за время  $\Delta t$  и выбора величины упреждения по скорости  $\Delta v$  на основе предварительно сформированной диаграммы изменения интенсивности торможения рассматриваемого вагона при движении по тормозной позиции (ТП). Здесь же будет рассмотрен алгоритм оценки адекватности выдвигаемого прогноза величины  $a_{\text{пр}}$  на базе теории нечетких множеств.

Анализ показывает, что диаграмма зависимости интенсивности торможения от координаты от-

цепа может быть построена для любого вагона на основе данных о ГВЗ (длины замедлителей  $l_3$ , расстояния между замедлителями  $l_{\text{МЗ}}$ ) и данных о тормозимом вагоне (длины вагона  $l_{\text{в}}$ , количества осей вагона  $n$ , внутренней базы вагона  $l_{\text{вб}}$ , длины тележки вагона  $l_{\text{тел}}$ ). На рисунке 1 представлен алгоритм вычисления числа осей отцепа  $z$ , одновременно находящихся на заторможенных ГВЗ, для любой точки  $x$  ТП. Основную последовательность действий данного алгоритма можно условно разделить на две части. Первая часть (шаги 5–12) представляет собой последовательность операций по определению местоположения осей первой тележки вагона (шаги 7, 11) и проверке нахождения  $j$ -той оси тележки с относительной координатой  $l_x$  на заторможенном ГВЗ (шаг 10). Логическая функция  $\varphi(x)$  принимает значение 1, если в координате  $x$  ТП расположен ГВЗ, значение 0, если замедлителя в точке  $x$  нет. Вторая часть алгоритма (шаги 13–18) выполняет аналогичные действия для второй тележки вагона. Изменяя переменную  $x$  от 0 до  $l_t$  с шагом  $\Delta x$  во внешнем цикле алгоритма и вычисляя значение  $z$  для каждого значения  $x$  (шаги 6–18), получаем массив значений для построения графика зависимости  $z(x)$ .

Аналитически функцию  $\varphi(x)$  для ТП, оборудованной двумя замедлителями, можно записать в следующем виде

$$\varphi(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 0; \\ 1, & \text{если } 0 < x \leq l_3; \\ 0, & \text{если } l_3 < x \leq l_3 + l_{\text{МЗ}}; \\ 1, & \text{если } l_3 + l_{\text{МЗ}} < x \leq 2l_3 + l_{\text{МЗ}}; \\ 0, & \text{если } x > 2l_3 + l_{\text{МЗ}}. \end{cases}$$

При необходимости формирования зависимостей  $z(x)$  для групповых отцепов (состоящих из двух и более вагонов) представленный алгоритм (см. рисунок 1) можно модифицировать путем до-

бавления операций по вычислению функции  $\varphi(x)$  для осей вагонов, следующих в отцепе за головным. Такие вычисления следует добавлять в исходный алгоритм между операциями 18 и 19. При этом координату  $j$ -той оси  $l_x$  относительно головы отцепа следует определять с учетом длин по автосцепкам  $l_{ac}$  всех впереди идущих вагонов. На рисунке 2 представлен график зависимости  $z(x)$ , построенный для отцепа из 3-х вагонов (вагон-хоппер 22-4003, платформа для контейнеров 13-9004, транспортер восьмиосный 14-6063).

Следует отметить, что при торможении отцепа нажимными балочными ГВЗ интенсивность торможения  $a_3$  прямо пропорциональна количеству осей, находящихся на замедлителях. Измерив установленное значение замедления  $a_{31}$ , соответствующее движению первой тележки вагона по первому замедлителю ТП, на основе полученной зависимости  $z(x)$  можно сформировать зависимость интенсивности торможения от координаты отцепа  $a_3(x)$ . Устройство управления ГВЗ, располагающее законом изменения интенсивности торможения от координаты, способно вычислить среднюю интенсивность торможения вагона за интервал времени  $[t_0; t_0 + \Delta t]$  уже в момент  $t_0$ .

В течение фиксированного интервала времени  $\Delta t_x$  ( $\Delta t_x \ll \Delta t$ ) устройство управления тормозной позицией производит определенный набор операций:

1) измерение текущего значения скорости движения отцепа  $v_i$  с помощью РИС и сохранение этого значения в оперативной памяти устройства;

2) вычисление текущего значения интенсивности торможения  $a_i$  как отношения разности  $v_{i-1} - v_i$  к величине интервала времени  $\Delta t_x$ ;

3) вычисление приращения координаты  $\Delta x$  (шаг 7 или шаг 8 алгоритма в зависимости от выполнения условия логического блока б) и вычисление координаты  $x$ ;

4) прогнозирование среднего значения интенсивности торможения на основе вычисленных значений  $a_i, v_i, x$  (рисунок 4);

5) вычисление упреждения по скорости для полученного на шаге 10 прогнозируемого значения интенсивности торможения;

б) принятие решения.

Алгоритм функционирования устройства управления замедлителями предполагает слежение за изменением скорости отцепа и выдвигание прогноза о величине  $a_{пр} = f_a(a_i, v_i, x, \Delta t)$  на каждом такте управления  $\Delta t_x$ .

Идеология прогнозирования строится на том обстоятельстве (рисунок 4), что при известных параметрах движения вагона в момент времени  $t_0$  (координате  $x$ , текущей скорости движения  $v_i$ , текущей интенсивности торможения  $a_i$ ) можно

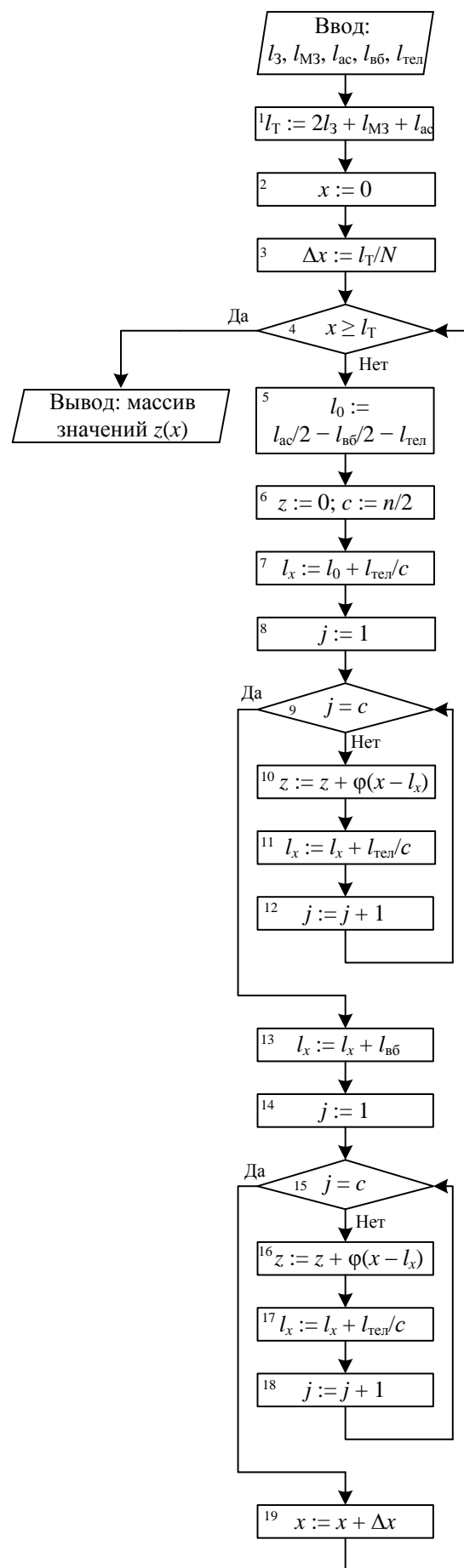


Рисунок 1 – Алгоритм формирования зависимости величины  $z$  от координаты отцепа

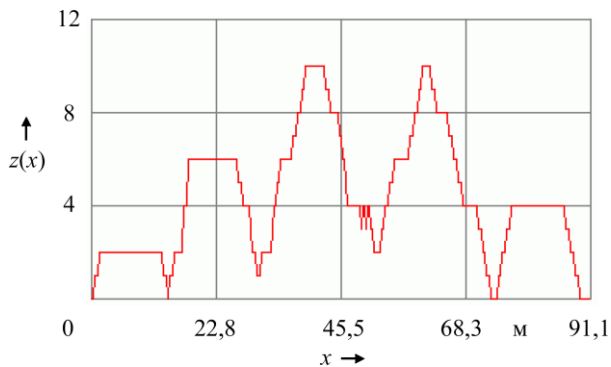


Рисунок 2 – График зависимости  $z(x)$  для отцепа из трех вагонов ( $n = 16$ )

определить координату отцепа  $x_{np}$  (шаг 9 или 10), в которой он окажется в момент  $t_0 + \Delta t_x$ .

Следовательно, можно определить и интенсивность торможения отцепа для данной координаты по построенной зависимости  $a_3(x_{np}) = \frac{1}{2}a_{31}z(x_{np})$  (шаг 11).

Просчитав и другие параметры движения (шаги 9, 10, 14), можно спрогнозировать движение отцепа на время следующего цикла  $\Delta t_x$ .

Следует отметить, что при проведении реальных испытаний будет иметь место разность между фактической интенсивностью торможения за время  $\Delta t$  и значением  $a_{np}$ . Ошибки прогнозирования будут возникать по причине наличия погрешности определения текущей координаты  $x$  движущегося отцепа, полученной косвенным методом на основе значений фактической скорости  $v_i$  и  $v_{i-1}$ . Погрешность же определения фактической скорости может быть вызвана флуктуацией частоты доплеровского сигнала РИС, пропаданием сигнала, а также наличием инерционности измерителя скорости.

С момента вступления первой тележки вагона на заторможенный ГВЗ до момента принятия решения о растормаживании замедлителей ТП в реальных условиях проходит от 3 до 30 с. За это время система управления может сформировать статистические данные о величине ошибки прогнозирования, на основе которых может быть идентифицирована одна из следующих ситуаций:

1) прогнозируемые значения  $a_{np}$  *достаточно хорошо* согласуются со значениями интенсивности торможения, полученными косвенным методом в режиме реального времени  $a_{\phi}$ ;

2) прогнозируемые значения величины  $a_{np}$  *удовлетворительно* согласуются со значениями, полученными при измерениях. Существует некоторая функциональная зависимость

$$\xi(t) = a_{np}(t) - a_{\phi}(t);$$

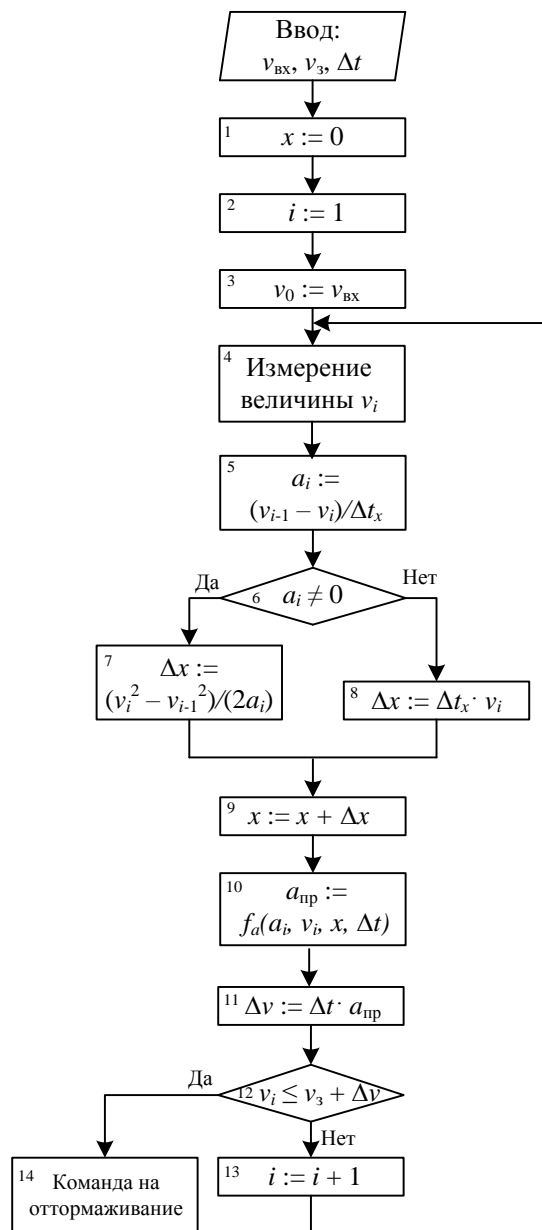


Рисунок 3 – Алгоритм работы устройства управления замедлителями

3) прогнозируемые значения величины  $a_{np}$  *неудовлетворительно* согласуются со значениями  $a_{\phi}$ . Присутствует *достаточно большое* количество ошибок прогнозирования.

Проанализировав сложившуюся ситуацию, система управления выбирает стратегию дальнейших действий. Если имеет место ситуация (1), то управление осуществляется в соответствии с алгоритмом (см. рисунок 3). В том случае, если имеет место ситуация (2), то следует вводить поправочные коэффициенты для значений  $a_{np}$ , ориентируясь при этом на функцию  $\xi(t)$ .

Ситуация (3) свидетельствует о значительном рассогласовании прогнозируемых и фактических параметров движения. Применение основного алгоритма становится неоправданным с точки зрения безопасности и качества функционирования.

ния ТП. Здесь необходимо предусмотреть возможность перехода на дополнительный (резервный) алгоритм управления замедлителями.

Модель выбора стратегии управления можно представить в виде набора продукционных правил, в каждом из которых конкретной ситуации ставится в соответствие конкретная стратегия:

ЕСЛИ прогноз достаточно хороший, ТО использовать основной алгоритм;

ЕСЛИ прогноз удовлетворительный, ТО использовать основной алгоритм с поправочными коэффициентами;

ЕСЛИ прогноз неудовлетворительный, ТО использовать резервный алгоритм.

Для того, чтобы система управления смогла идентифицировать ситуацию, складывающуюся в процессе торможения отцепа, необходимо осуществить *фаззификацию* (введение нечеткости). Четкой величине относительной погрешности прогнозирования  $\delta = |\xi(t)/a_\phi(t)$  ставится в соответствие лингвистическая (нечеткая) переменная <качество прогноза>. Данная переменная может принимать значения из ограниченного набора нечетких значений (термов)

<качество прогноза> = {хорошее, удовлетворительное, неудовлетворительное}.

Используя математический аппарат теории нечетких множеств, для любого четкого значения величины  $\delta$  можно определить степени его принадлежности к нечетким термам: *хорошее качество* –  $m_x$ , *удовлетворительное качество* –  $m_y$ , *неудовлетворительное* –  $m_n$ . На основе экспертных оценок на ограниченном интервале [0, 1] вводятся функции принадлежности термов нечеткой переменной <качество прогноза>  $m_x(\delta)$ ,  $m_y(\delta)$ ,  $m_n(\delta)$  (рисунок 5, а).

Выходной нечеткой величиной может быть переменная <коррекция прогноза>. Набор термов для переменной <коррекция прогноза> можно представить следующим образом: <коррекция прогноза> = {незначительная, оперативная, экстренная}.

По аналогии с входной переменной модели, нечеткой величине <коррекция прогноза> ставится в соответствие четкое значение поправочного коэффициента  $\alpha$ , который принимает значения из интервала [0, 1]. Для определения степеней принадлежности термов выходной переменной по известному значению коэффициента  $\alpha$  зададим функции принадлежности:  $\mu_n(\alpha)$  – *незначительная коррекция*,  $\mu_o(\alpha)$  – *оперативная коррекция*,  $\mu_3(\alpha)$  – *экстренная коррекция* (рисунок 5, б).

Логический вывод четкого значения поправочного коэффициента  $\alpha$  проводится в несколько этапов:

– *нечеткая импликация*. Для четкого значения относительной погрешности прогнозирования  $\delta$

вычисляем функции принадлежности заключений каждого продукционного правила

$$\mu_n(\delta, \alpha) = \min(m_x(\delta), \mu_n(\alpha)),$$

$$\mu_o(\delta, \alpha) = \min(m_y(\delta), \mu_o(\alpha)),$$

$$\mu_3(\delta, \alpha) = \min(m_n(\delta), \mu_3(\alpha));$$

– *нечеткая композиция*. Получаем результирующую функцию всего набора продукционных правил  $\mu_\Sigma(\delta, \alpha) = \max(\mu_n(\alpha, \delta), \mu_o(\alpha, \delta), \mu_3(\alpha, \delta));$

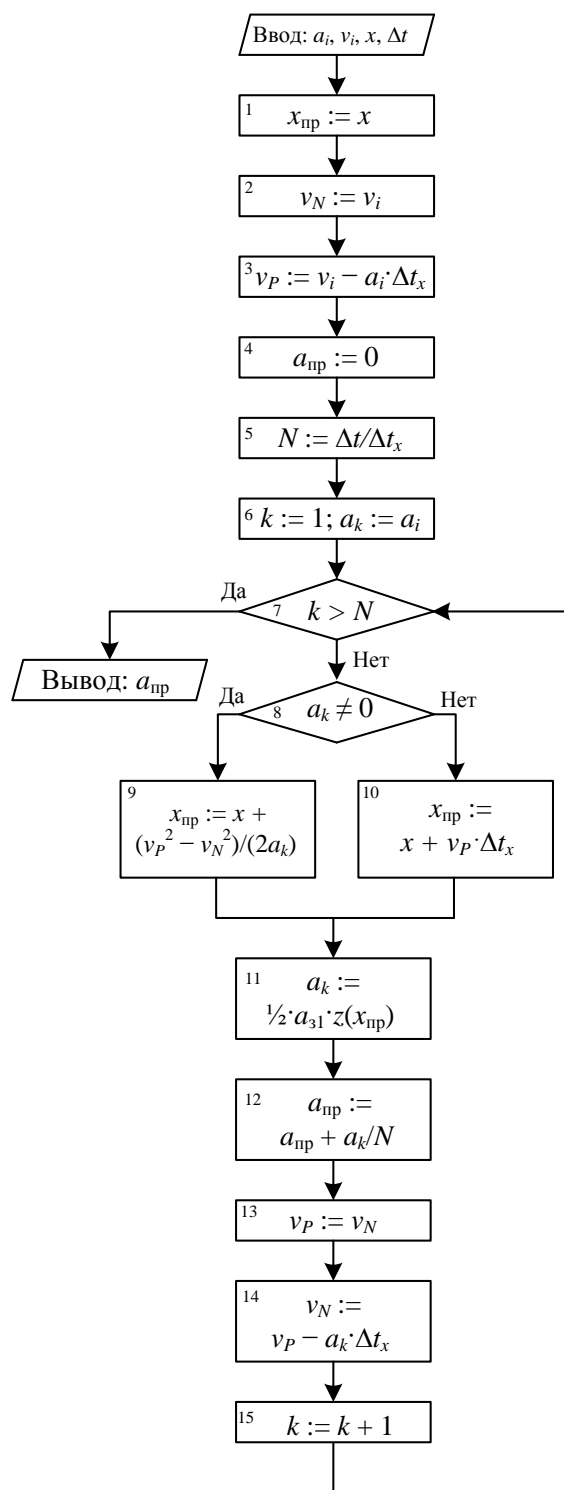


Рисунок 4 – Алгоритм прогнозирования интенсивности торможения

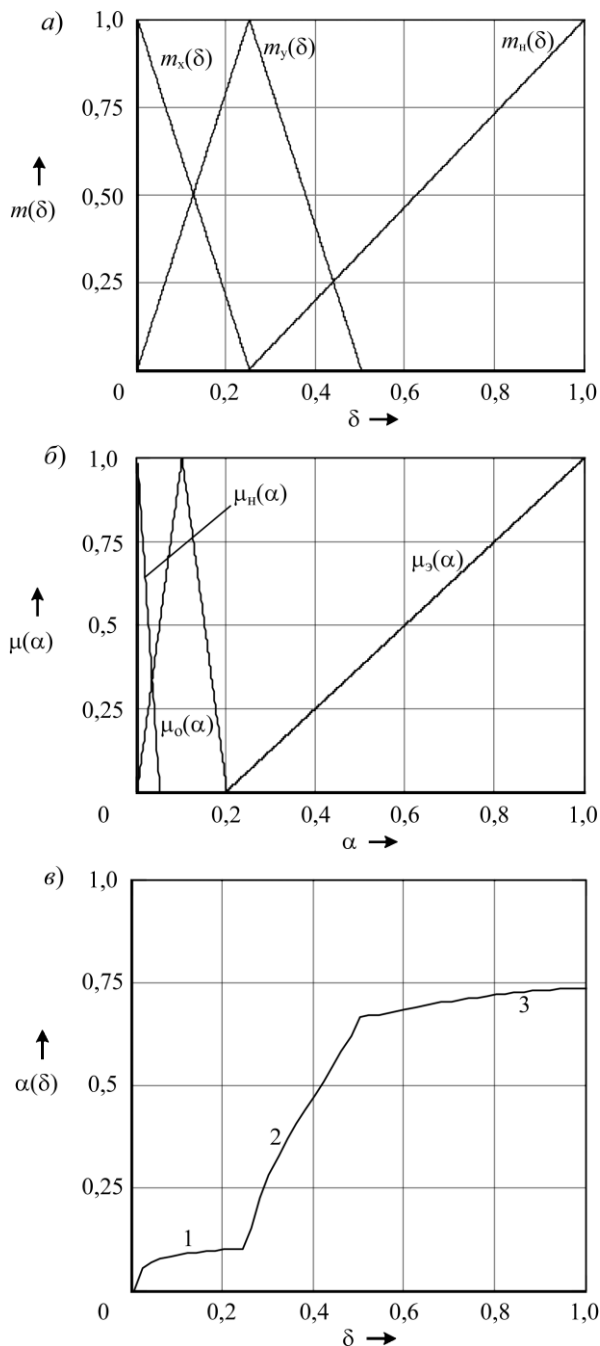


Рисунок 5 – Графики функций принадлежности термов входной (а) и выходной (б) переменных; зависимость выходного параметра нечеткой модели от входного (в)

– дефаззификация. Переход от нечеткости к четким значениям поправочного коэффициента  $\alpha$  осуществляем по формуле

Получено 23.02.2010

**N. K. Modin, V. V. Volynets.** Models of velocity adjustment of sliding from hump carriages under conditions of uncertain environment.

Achievement problem of automatic movement adjustment of sliding from hump carriages under conditions of uncertain information about control objects is described. Based on breaking intensity diagram models of velocity adjustment of sliding from hump carriages, which founded on algorithm of prediction of average breaking intensity value and algorithm of selection of speed forestalling value, are developed. Algorithm of construction of breaking intensity diagram for any type of railway cut including cuts of come carriages with different number of axles is developed. Based on fuzzy sets theory simply connected logical-and-linguistic model of algorithmic decision of raised prediction verification for breaking intensity value and speed forestalling value is developed.

$$\alpha(\delta) = \frac{\int_0^1 \alpha \cdot \mu_{\Sigma}(\delta, \alpha) d\alpha}{\int_0^1 \mu_{\Sigma}(\delta, \alpha) d\alpha}.$$

На графике функции  $\alpha(\delta)$  (рисунок 5, в) имеются три характерных участка. Участок 1 соответствует ситуации, когда значение  $a_{пр}$  хорошо согласуется с фактическим значением интенсивности торможения.

Участок 2 соответствует ситуации, когда имеет место зависимость  $a_{пр}(t) - a_{ф}(t) = \xi(t)$ . Прогноз интенсивности торможения может быть скорректирован  $a_{пр} = a_{ф}(1 \pm \alpha)$ .

Участок 3 отражает ситуацию, при которой очевидна невозможность использования основного алгоритма управления, требуется переход на резервный алгоритм.

**Выводы.** Введение нечеткости в модель управления ГВЗ позволяет получить статистическую характеристику регулятора с необходимыми характером нелинейности участков характеристики. Регулятор с такой характеристикой обладает более низкой чувствительностью к возмущениям внешней среды и случайным изменениям параметров объекта управления. Так, сравнительный анализ линейного регулятора скорости и регулятора с нечеткой моделью управления показал, что нечеткий регулятор имеет меньшую величину среднего отклонения фактической скорости выхода отцепы от требуемой. Внедрение регулятора скорости на основе нечеткой модели управления позволит уменьшить число «окон» на путях сортировочного парка и вероятность превышения скорости соударения вагонов.

#### Список литературы

- 1 **Модин, Н. К.** Безопасность функционирования горочных устройств / Н. К. Модин. – М. : Транспорт, 1994. – 173 с.
- 2 Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров [и др.]. – М. : Наука, 2006. – 333 с.