

УДК 656.212:621-59

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

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

Рассмотрена проблема осуществления процесса 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. Дан алгоритм построения диаграммы интенсивности торможения для отцепов различных типов, в том числе и для тех, которые состоят из нескольких вагонов с различным количеством осей. Приведено алгоритмическое решение для проверки адекватности выдвигаемого прогноза величин интенсивности торможения и упреждения по скорости с использованием одноязычной 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 и 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, число 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 Δt (времени с момента подачи команды на оттормаживание до момента прекращения уменьшения скорости). По известным значениям a_3 и Δt вычисляют величину упреждения по скорости $\Delta v = a_3 \Delta t$, которая позволяет компенсировать инерционность горочных замедлителей. Измеренную с помощью РИС фактическую скорость движения отцепа сравнивают с суммой $v_{\text{вых}} + \Delta v$, и при достижении равенства $v_{\phi} = v_3 + \Delta v$ система выдает команду на оттормаживание замедлителей.

Следует отметить, что при движении отцепа по тормозной позиции, оборудованной ГВЗ, тормозное действие замедлителей в каждый момент времени носит нерегулярный характер, и определяется количеством осей вагона, одновременно находящихся на заторможенных замедлителях тормозной позиции (ТП). Изменение числа тормозимых осей при движении отцепа по ТП приводит

к изменению величины интенсивности торможения a_3 . При этом каждому числу одновременно тормозимых осей (ОТО) соответствует своя величина интенсивности торможения a_3 : одна ось – a_{31} , две – a_{32} , три – a_{33} и четыре – a_{34} . В этом случае можно поставить в соответствие число осей, одновременно тормозимых замедлителями, определенному значению замедления движения отцепа при его торможении (интенсивности торможения). На рисунке 1 представлена диаграмма изменения интенсивности торможения в функции от координаты x первой оси первой тележки вагона в зоне действия тормозной позиции l_T четырехосного вагона.

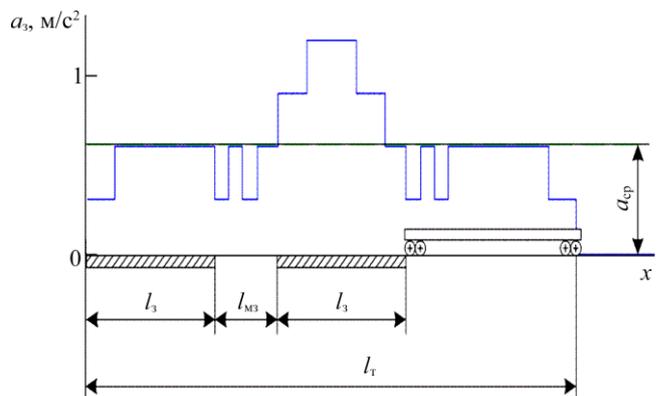


Рисунок 1 – Диаграмма интенсивности торможения вагона при движении по ТП, оборудованной двумя ГВЗ типа НК114, ЗВУ, КЗЗ

В случае с четырехосным вагоном зону действия тормозной позиции можно разбить на 15 неравных участков, для каждого из которых характерно определенное значение замедления a_{3i} . Движение шестиосного вагона по ТП, оборудованной двумя ГВЗ, характеризуется диаграммой изменения интенсивности торможения с 22 неравными участками торможения.

Учитывая, что инерционность замедлителей составляет 0,8–1,0 с, можно предположить, что за время Δt координата тормозимого отцепя (координата первой оси первой тележки вагона) переместится из участка с интенсивностью торможения a_{zi} в участок с интенсивностью a_{zk} , при этом изменение текущей величины замедления отцепя составит 0,3–0,6 м/с². В источнике [1, с. 32] показано, что процесс реализации заданных скоростей выхода из ТП без прогнозирования характера изменения интенсивности торможения во времени или по координате отцепя может оказаться неэффективным с точки зрения обеспечения качества работы ТП.

В данной статье рассмотрен алгоритм прогнозирования средней величины интенсивности торможения $a_{пр}$ за время Δt и выбора величины упреждения по скорости Δv на основе предварительно сформированной диаграммы изменения интенсивности торможения рассматриваемого вагона при движении по ТП. Здесь же будет рассмотрен алгоритм оценки адекватности выдвигаемого прогноза величины $a_{пр}$ на базе теории нечетких множеств.

Анализ показывает, что диаграмма зависимости интенсивности торможения от координаты отцепя может быть построена для любого вагона на основе данных о ГВЗ (длины замедлителей l_3 , расстояние между замедлителями $l_{мз}$) и данных о тормозимом вагоне (длины вагона l_{ac} , количества осей вагона n , внутренней базы вагона $l_{вб}$, длины тележки вагона $l_{тел}$). На рисунке 2 представлен алгоритм вычисления числа осей отцепя z , одновременно находящихся на заторможенных замедлителях, для любой точки x тормозной позиции. 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 замедлителе (шаг 10). Логическая функция $\varphi(x)$ принимает значение 1, если в координате x тормозной позиции расположен замедлитель, 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 Δx во внешнем цикле алгоритма и вычисляя значение z для каждого значения x (шаги 6–18), после выполнения алгоритма получаем массив значений для построения графика зависимости $z(x)$.

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

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

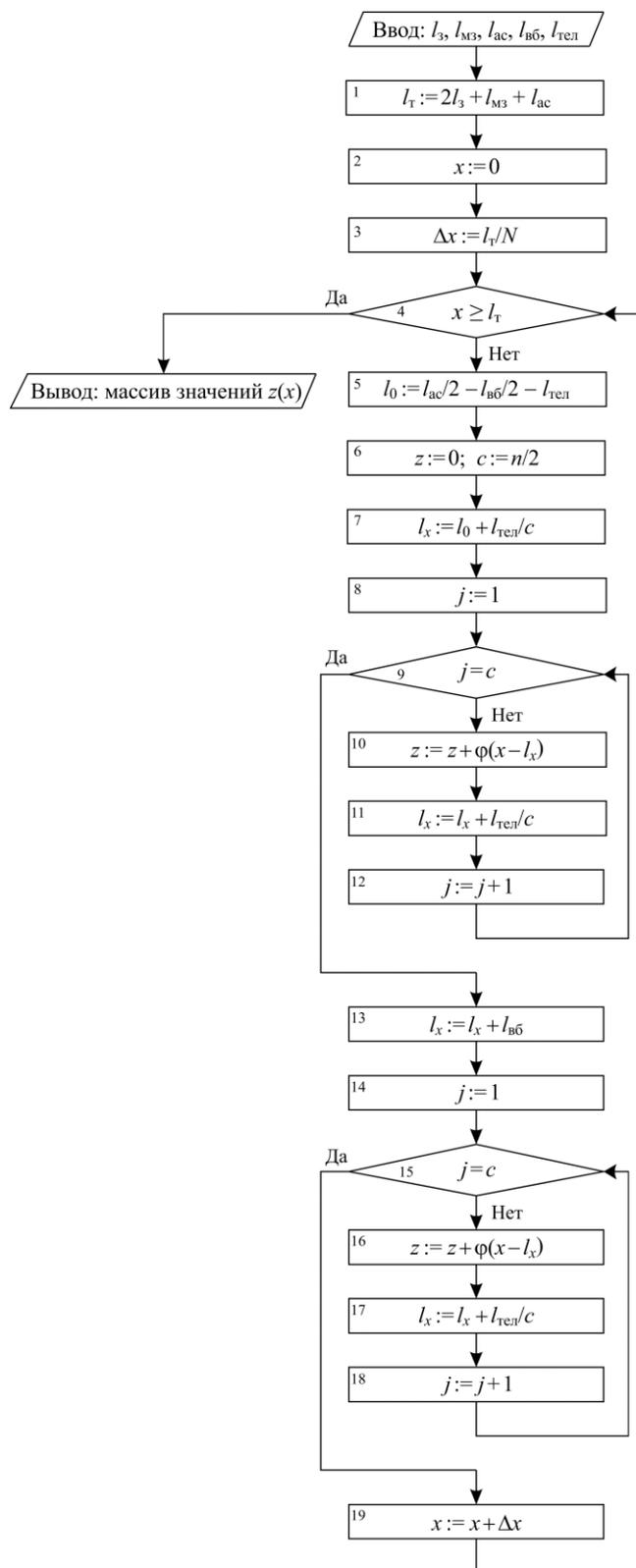


Рисунок 2 – Алгоритм формирования зависимости величины z от координаты отцепя x

При необходимости формирования зависимостей $z(x)$ для групповых отцепов (состоящих из двух и более вагонов) представленный алгоритм (рисунок 2) можно модифицировать путем добавления 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 3 представлены графики зависимостей $z(x)$, построенные для отцепа из двух полувагонов модели 12-1592 (рисунок 3, а) и для отцепа из трех вагонов (вагон-хopper 22-4003, платформа для контейнеров 13-9004, транспортер восьмисный 14-6063; рисунок 3, б).

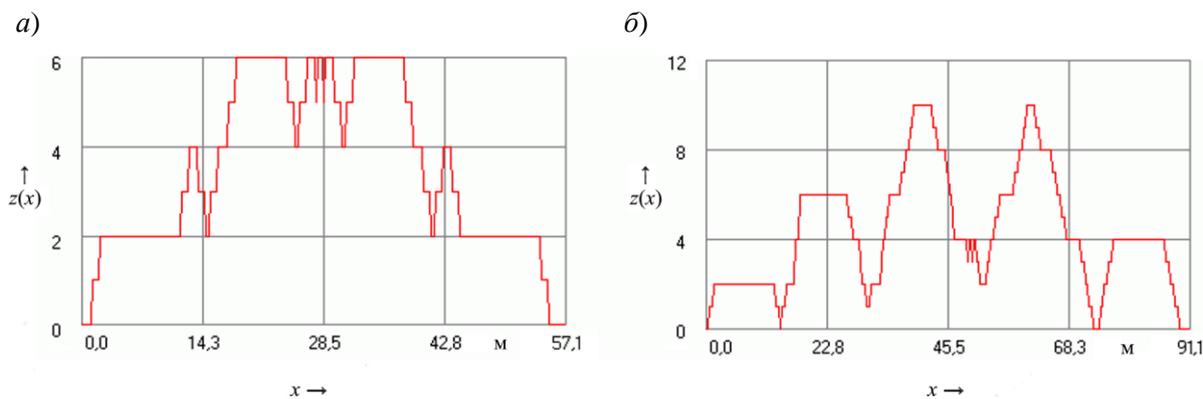


Рисунок 3 – Графики зависимостей $z(x)$ для отцепов с различным количеством осей: а – для отцепа из 2 вагонов ($n = 8$); б – для отцепа из 3 вагонов ($n = 16$)

Следует отметить, что при торможении отцепа нажимными балочными замедлителями интенсивность торможения a_3 прямо пропорциональна количеству осей, находящихся на замедлителях. Измерив установившееся 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 вагонными замедлителями, 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 . Выполнив предварительные операции [измерение значения a_{31} и формирование функции $a_3(x)$], данное устройство переходит в рабочий режим и функционирует в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 4.

В течение фиксированного интервала времени Δt_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 Δt_x ;
- 3) вычисление приращения координаты Δx (шаги 7 или 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 (алгоритм действий по вычислению прогнозируемого значения $a_{пр}$ представлен на рисунке 5);

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

б) принятие решения.

Если условие блока 12 выполняется (фактическая скорость отцепа равна сумме заданной скорости выхода и упреждения по скорости), то устройство подает команду на оттормаживание замедлителей. В течение интервала времени Δt замедлители находятся еще в заторможенном состоянии. Введение упреждения по скорости позволяет компенсировать инерционность замедлителей, во время действия электропневматических устройств замедлителей скорость отцепа снижается на величину Δv . По окончании интервала Δt замедлители переходят в отторможенное состояние, далее отцеп движется под действием собственного веса.

В том случае, если условие блока 12 не выполняется, то последовательность действий (шаги 4–13) повторяется до тех пор, пока скорость вагона не снизится до необходимой величины.

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 Δt_x .

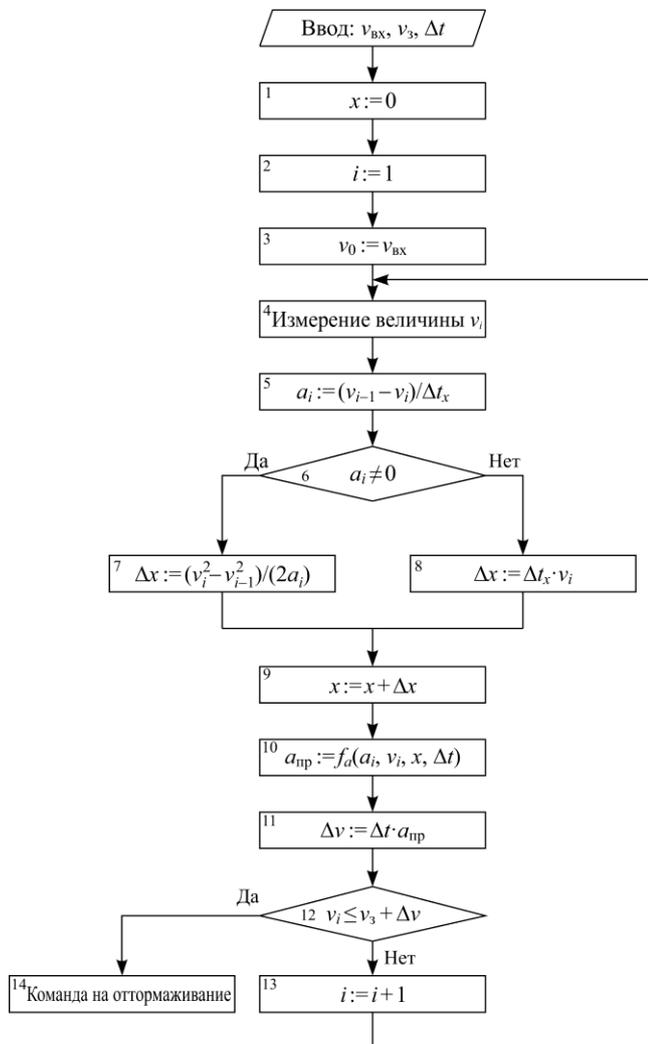


Рисунок 4 – Алгоритм работы устройства управления замедлителями

Идеология прогнозирования строится на том обстоятельстве (см. рисунок 5), что при известных параметрах движения вагона в момент времени t_0 (координате x , текущей скорости движения v_i , текущей интенсивности торможения a_i) можно определить координату отцепа $x_{пр}$ (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 уже построенной зависимости $a_3(x_{пр}) = \frac{1}{2} a_{31} z(x_{пр})$ (шаг 11).

Просчитав и другие параметры движения (шаги 9, 10, 14), можно спрогнозировать движение отцепа на время следующего цикла Δt_x . Проведя $N = \Delta t / \Delta t_x$ циклических вычислений, прогнозируемое значение $a_{пр}$ найдем как среднее значение величин интенсивности торможения, полученных в каждом цикле прогнозирования

$$a_{пр} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_k.$$

Следует отметить, что при проведении реальных испытаний будет иметь место разность между фактической интенсивностью торможения за время Δt и значением $a_{пр}$. Ошибки прогнозирования будут возникать из-за 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 скоростемера. Радиолокационный измеритель скорости имеет интегрирующее звено в тракте преобразования сигнала, что обуславливает запаздывание показаний скоростемера относительно фактической скорости отцепа.

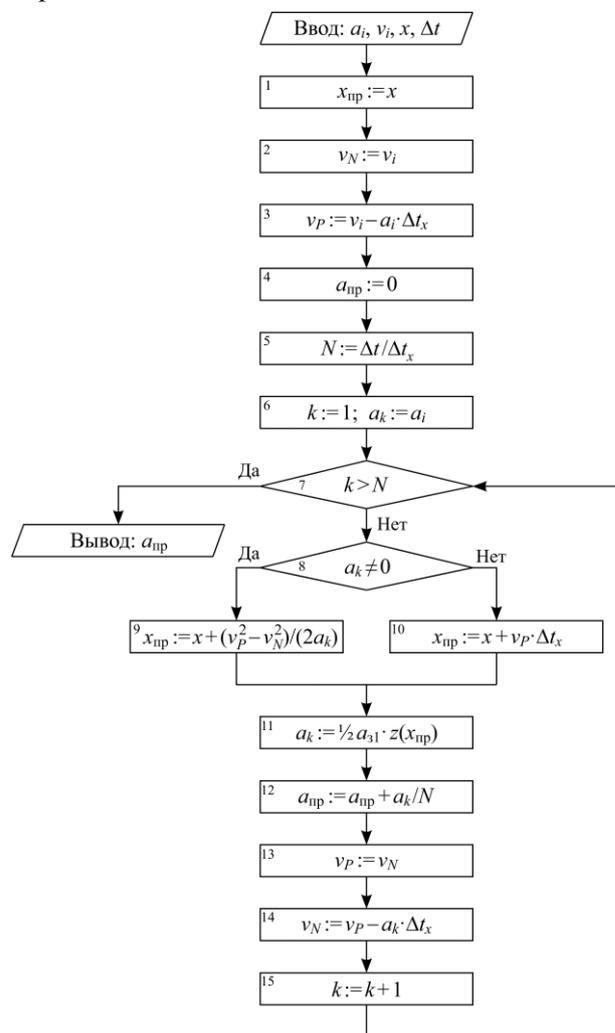


Рисунок 5 – Алгоритм прогнозирования интенсивности торможения

С момента вступления первой тележки вагона на заторможенный замедлитель 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 величины $a_{пр}$ *достаточно хорошо* согласуются со значениями интенсивности торможения, полученными косвенным методом в режиме реального времени $a_{ф}$;

2) прогнозируемые значения величины $a_{пр}$ *удовлетворительно* согласуются со значениями, полученными при измерениях. Существует некоторая функциональная зависимость $\xi(t) = a_{пр}(t) - a_{ф}(t)$;

3) прогнозируемые значения величины $a_{пр}$ *неудовлетворительно* согласуются со значениями $a_{ф}$. Присутствует *достаточно большое* количество больших 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 4), а прогнозирование значений $a_{пр}$ осуществляется по алгоритму, представленному на рисунке 5. В том случае, если имеет место ситуация (2), то следует вводить поправочные коэффициенты для значений $a_{пр}$, ориентируясь на функцию $\xi(t)$. Управление тормозными устройствами осуществляется при этом по основному алгоритму (см. рисунок 4). Ситуация (3) свидетельствует о значительном рассогласовании прогнозируемых и фактических параметров движения. Применение основного алгоритма становится неоправданным с точки зрения безопасности и качества функционирования тормозной позиции. Здесь необходимо предусмотреть возможность перехода на дополнительный (резервный) алгоритм управления замедлителями.

Таким образом, устройство управления замедлителями, располагая числовыми значениями ошибки прогнозирования и качественными критериями согласования прогнозируемой величины с фактической (*достаточно хорошо, удовлетворительно, неудовлетворительно*), может обеспечить принятие решения по выбору стратегии управления, пока выполняется условие

$$v_{ф} \geq \Delta v + v_3.$$

Модель выбора стратегии управления можно представить в виде набора продукционных правил, каждому из которых в 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). Например, четкой величине относительной погрешности прогнозирования $\delta = |\xi(t)|/a_{ф}(t)$ 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 δ 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>* $m_x(\delta)$, $m_y(\delta)$, $m_n(\delta)$. В данной работе предлагается использовать треугольные функции принадлежности элементов нечеткого множества (рисунок 6).

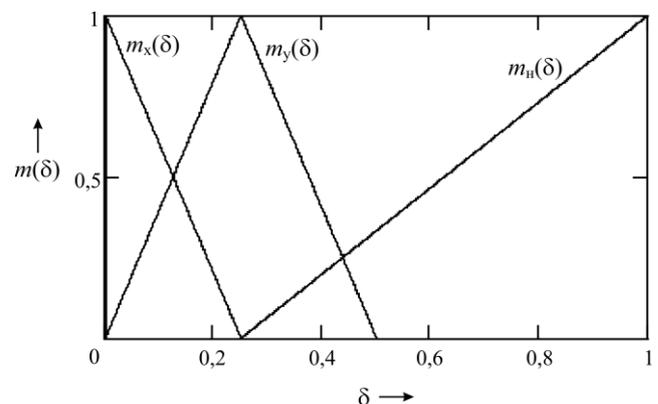


Рисунок 6 – Функции принадлежности относительной погрешности прогнозирования

Набор термов для переменной *<коррекция прогноза>* может быть представлен следующим образом: *<коррекция прогноза> = {незначительная, оперативная, экстренная}*.

По аналогии с входной переменной модели нечеткой величине *<коррекция прогноза>* ставится в соответствие четкое значение поправочного коэффициента α , который принимает значения из интервала $[0, 1]$. Для определения степеней принадлежности термов выходной переменной по известному значению коэффициента α зададим

функции принадлежности: $\mu_n(\alpha)$ – незначительная коррекция, $\mu_o(\alpha)$ – оперативная коррекция, $\mu_3(\alpha)$ – экстренная коррекция (рисунок 7).

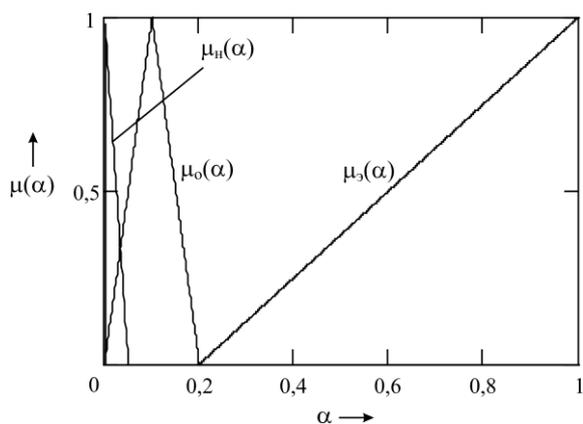


Рисунок 7 – Функции принадлежности поправочного коэффициента α

Логический вывод четкого значения поправочного коэффициента α проводится в несколько этапов.

Нечеткая импликация. Для четкого значения относительной погрешности прогнозирования δ вычисляем функции принадлежности заключений каждого продукционного правила, используя поочередную операцию взятия минимума между степенями принадлежности входной переменной $m_x(\delta)$, $m_y(\delta)$, $m_n(\delta)$ и функциями принадлежности выходной переменной $\mu_n(\alpha)$, $\mu_o(\alpha)$, $\mu_3(\alpha)$:

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

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

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

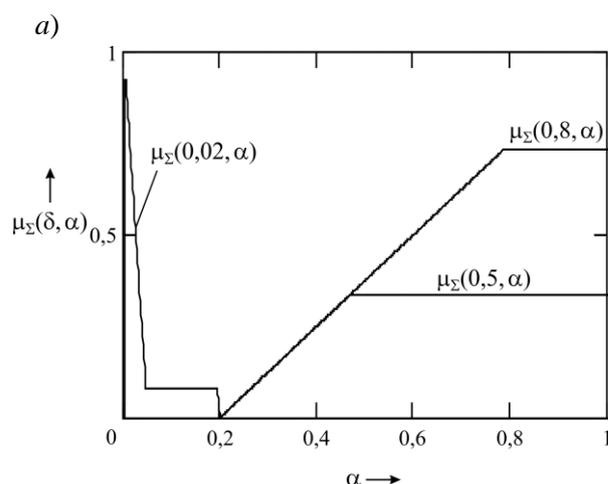
Нечеткая композиция. Применяя операцию взятия максимума на интервале значений от 0 до 1, получаем результирующую функцию всего набора продукционных правил

$$\mu_\Sigma(\delta, \alpha) = \max(\mu_n(\alpha, \delta), \mu_o(\alpha, \delta), \mu_3(\alpha, \delta)).$$

На рисунке 8, а представлены результирующие функции для трех различных значений входного параметра. Трехмерный график функции $\mu_\Sigma(\delta, \alpha)$ изображен на рисунке 8, б.

Дефаззификация. Переход от нечеткости к четким значениям поправочного коэффициента α осуществляется методом нахождения центра тяжести фигуры, описанной графиком функции $\mu_\Sigma(\delta, \alpha)$. Для конкретного значения входного параметра δ четкое значение коэффициента α находим по формуле

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



б)

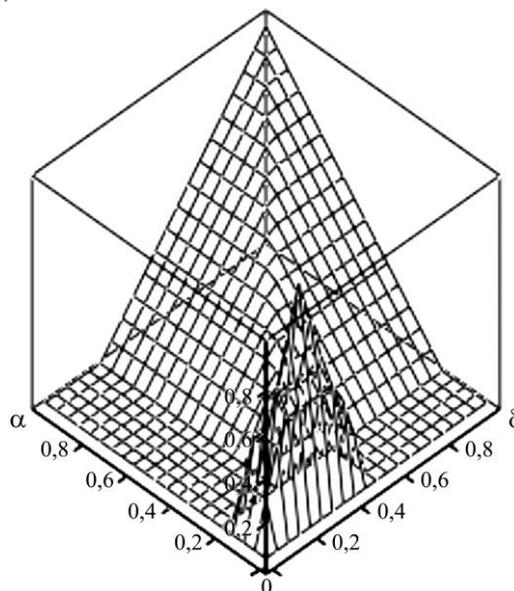


Рисунок 8 – Графики результирующей функции $\mu_\Sigma(\delta, \alpha)$

Задаваясь значениями δ из интервала $[0, 1]$, можно построить график зависимости выходного параметра нечеткой модели управления от входного (рисунок 9).

На графике функции $\alpha(\delta)$ имеется три характерных участка. Участок 1 соответствует ситуации, когда значение $a_{пр}$ хорошо согласуется с фактическим значением интенсивности торможения, участок 2 – 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 основ-

ного алгоритма управления, требуется переход на резервный алгоритм.

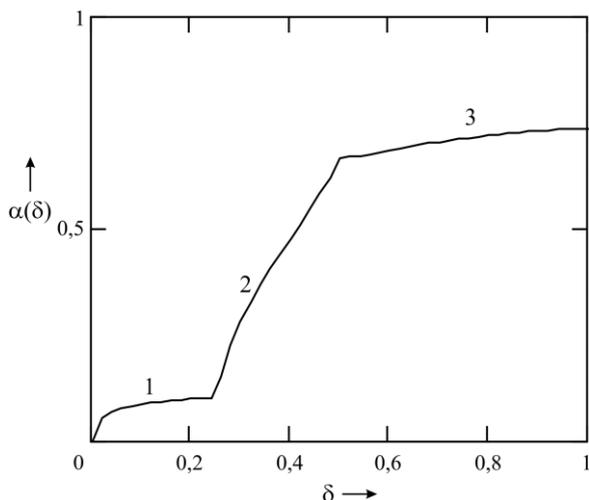


Рисунок 9 – График функции зависимости выходного параметра нечеткой модели управления от входного параметра

Введение нечеткости в модель управления горочными вагонными замедлителями позволяет получить статистическую характеристику регулятора с необходимым 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 ре-

гулятора скорости и регулятора с нечеткой моделью управления показал, что нечеткий регулятор имеет меньшую величину среднего отклонения фактической скорости выхода отцепов 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 Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон. / К. Асаи [и др.] ; под ред. Т. Тэрано. – М. : Мир, 1993. – 368 с.
- 3 Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров [и др.]. – М. : Наука, 2006. – 333 с.
- 4 **Модин, Н. К.** Синтез авторегулятора скорости на основе нечеткой логики в системе автоматического регулирования скорости скатывающихся с горки отцепов / Н. К. Модин // Проблемы безопасности на транспорте : материалы IV междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2007. – С. 160–161.
- 5 **Волынец, В. В.** Нейросетевое управление процессом автоматического регулирования скорости скатывания отцепов на сортировочной горке / В. В. Волынец, К. С. Шеметков // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы X Респ. конф. студентов и аспирантов. – Гомель : ГТУ, 2007. – С. 130.

Получено 04.09.2008

N. K. Modin, V. V. Volynets. Speed control models sliding from hump carriages under uncertain background information.

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.