

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 517.977.1 : 656.2 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_8

*В. О. Зехцер, А. А. Костоглотов, С. У, Б. Ли***СИНТЕЗ МОДЕЛИ КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА
ПРИ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ
В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ
С ДЕФИЦИТОМ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Аннотация. Рассмотрен синтез модели нечеткого квазиоптимального регулятора и анализ его эффективности по сравнению с известным регулятором скорости поезда при кратковременных отклонениях от заданного режима движения. Задача управления системой с дефицитом управляющих воздействий имеет особую значимость для железнодорожного транспорта, в особенности для высокоскоростного движения. Механические системы как объекты управления представляют собой существенно нелинейные динамические системы высокого порядка. Кроме того, сложность оптимизации режимов функционирования таких систем связана с тем, что даже детальное моделирование не позволяет точно предсказать совокупное влияние всех динамических факторов, действующих на динамическую систему в условиях эксплуатации. Традиционно используемые на практике линейные законы управления с постоянными коэффициентами предназначены для стабилизации лишь одного конкретного режима движения, что делает их неэффективными в условиях дефицита управления и априорной неопределенности. Использование редукции оптимизационной задачи Лагранжа к изопериметрической позволяет получить квазиоптимальное решение задачи структурного синтеза, повышающее эффективность управления по сравнению с известными методами. Применение аппарата нечеткой логики позволяет провести параметрический синтез управления, обеспечивая адаптивность к априорно неопределенным условиям эксплуатации.

Ключевые слова: квазиоптимальный закон управления, редукция задачи Лагранжа к изопериметрической, система с дефицитом управления, управление скоростью поезда, нечеткая логика.

Для цитирования: Синтез модели квазиоптимального нечеткого регулятора при априорной неопределенности в интеллектуальных транспортных системах с дефицитом управляющих воздействий / В. О. Зехцер, А. А. Костоглотов, С. У, Б. Ли // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 8–20. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_8.

Введение

Актуальной проблемой современной теории управления является разработка алгоритмов управления для механических систем, функционирующих в условиях дефицита управляющих воздействий. Такая ситуация возникает, когда количество независимых управляющих сигналов оказывается меньше числа степеней свободы объекта. Типовыми примерами таких объектов являются беспилотные транспортные средства, роботы-манипуляторы, подвижность которых может быть ограничена в определенных сценариях, и системы с отказавшими подвижными элементами [1, 2]. Типовые алгоритмы в таких условиях не способны обеспечить достаточную эффективность. Альтернативным способом решения является введение избыточных подвижных элементов, что, в свою очередь, ведет к существенному усложнению и удорожанию конструкции. Таким образом, актуальной задачей является разработка новых подходов к синтезу управления для нелинейных механических объектов в условиях дефицита управляющих воздействий.

Механические системы как объекты управления отличаются существенной нелинейностью и уравнениями движения, не разрешенными относительно старших производных. Их важной особенностью также является сильное динамическое взаимовлияние элементов.

Традиционные линейные регуляторы с постоянными коэффициентами, широко применяемые в задачах управления, оказываются непригодными для решения рассматриваемой проблемы. Их принципиальный недостаток – ориентация на стабилизацию единственного, заранее заданного режима работы, что не позволяет им адаптироваться к условиям дефицита управления. Следовательно, синтез управления для таких систем целесообразно проводить непосредственно в нелинейной постановке, избегая линеаризации. Подходы, основанные на линеаризованных моделях, обладают существенным ограничением: их параметры и сама структура управляющего устройства жестко привязаны к конкретному невозмущенному движению. Также область устойчивости таких систем может не включать реальные эксплуатационные возмущения, что грозит потерей устойчивости или недопустимым ухудшением качества функционирования системы.

Исследуя предельный случай управления «черным ящиком механической природы» при полном отсутствии информации о динамических параметрах системы, Е. С. Пятницкий разработал один из фундаментальных подходов к данной проблеме [3]. Предложенный им «принцип декомпозиции» заложил основу для создания универсальных законов управления. Такие законы управления способны обеспечивать устойчивость произвольного целевого режима движения из допустимого множества, не требуя точных знаний параметров объекта.

В работе [4] показано, что коррекцию кривой переключения можно провести, применив редукцию задачи Лагранжа к изопериметрической, что позволяет получить квазиоптимальное решение задачи синтеза управления, превосходящее по эффективности существующие методы.

Задача управления системой с дефицитом управляющих воздействий имеет особую значимость для железнодорожного транспорта, в особенности для высокоскоростного движения [5–7]. Рост интенсивности движения, сокращение межпоездных интервалов и повышение требований к энергоэффективности делают традиционные линейные регуляторы, настроенные на один режим, недостаточно эффективными. На железнодорожном транспорте дефицит управляющих воздействий проявляется, например, когда тяговый электропривод не может независимо управлять скоростью и ускорением поезда из-за ограничений по сцеплению колес с рельсами либо при отказе части тяговых двигателей. Кроме того, в процессе эксплуатации масса поезда известна неточно, распределение рекуперированной энергии торможения между другими потребителями и реостатами зависит от значительного числа заранее неизвестных факторов [8, 9], а также существуют различные сценарии кратковременных отклонений от заданного режима (порывы ветра, изменения профиля пути, краткосрочные ограничения скорости), после которых необходимо восстановить движение по графику. Составление графиков движения без учета модели регулятора приводит к неоптимальным энергозатратам [10, 11]. Сложность оптимизации режимов движения связана с тем, что даже детальное моделирование не позволяет точно предсказать совокупное влияние всех динамических факторов (ветровая нагрузка, состояние пути, изменения массы состава), действующих на поезд в условиях эксплуатации [12]. Таким образом, актуальной является задача создания интеллектуальных алгоритмов управления торможением и стабилизации, способных в режиме реального времени адаптироваться к изменяющимся условиям и выбирать оптимальный режим ведения поезда, что соответствует приоритетному направлению развития интеллектуальных транспортных систем.

Данную задачу можно формализовать в рамках теории систем с дефицитом управления. Модель управления движением поезда, объединяющая нелинейные взаимосвязанные электрические и механические подсистемы, естественным образом описывается как система с числом степеней свободы, превышающим число управляющих воздействий. Решение такой задачи для общего случая нелинейных динамических систем получено в виде структуры квазиоптимальных законов управления в работах [13, 14].

Открытым на текущий момент остается вопрос решения задачи поиска параметров предложенного управления в условиях априорно неизвестных внешних воздействий. Применение аппарата нечеткой логики позволяет провести параметрический синтез управления, обеспечивая адаптацию к априорно неопределенным условиям эксплуатации [15, 16].

Необходимость применения аппарата нечеткой логики в задачах управления скоростью высокоскоростных поездов обусловлена рядом фундаментальных причин, связанных с природой объекта управления и условиями его эксплуатации. Во-первых, движение поезда представляет собой сложный нелинейный динамический процесс с существенной параметрической неопределенностью: масса состава, коэффициенты сопротивления движению, характеристики сцепления колес с рельсами и эффективность рекуперативного торможения могут изменяться в широких пределах и не поддаются точному априорному измерению [17]. Во-вторых, внешние возмущения (порывы ветра, изменения профиля

пути, кратковременные ограничения скорости) носят случайный характер и не могут быть формализованы в виде детерминированных математических моделей [18]. Традиционные подходы, основанные на линейных регуляторах с постоянными коэффициентами, требуют либо точного знания параметров системы, либо не обеспечивают адаптации к изменяющимся условиям в реальном времени. Нечеткая логика позволяет преодолеть указанные ограничения за счет использования качественных экспертных знаний и лингвистических правил, что особенно ценно в условиях, когда построение точной математической модели затруднено или невозможно [19]. По сравнению с классическими методами нечеткому регулятору не требуется точная настройка на единственный режим работы, так как он способен плавно изменять свою структуру или параметры в зависимости от текущего отклонения от цели управления, обеспечивая робастность к априорно неизвестным возмущениям в условиях параметрической неопределенности. Как показано в работах [15, 16], применение нечеткой логики в системах управления поездами позволяет повысить энергоэффективность и точность отслеживания графика движения. Также использование модели нечеткого вывода Такаги – Сугено позволяет совместить логический вывод с аналитическими методами оптимизации [20], что особенно важно для синтеза квазиоптимальных законов управления в системах с дефицитом управляющих воздействий. Таким образом, применение аппарата нечеткой логики для построения регулятора на основе квазиоптимального закона управления решает проблему параметрического синтеза, что обеспечивает эффективное функционирование системы в реальных условиях эксплуатации высокоскоростного железнодорожного транспорта.

Цель работы – синтез модели нечеткого квазиоптимального регулятора, обеспечивающего повышение эффективности управления скоростью поезда как системой с дефицитом управляющих воздействий в условиях неопределенности.

Синтез управления для систем с дефицитом управляющих воздействий

Рассматривается объект управления, который может быть описан системой дифференциальных уравнений, относящейся к классу уравнений Лагранжа второго рода в обобщенных координатах $\mathbf{q} = \|q_s\|_{s=1}^n$:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + u_i(t), i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^n a_{ik}(\mathbf{q}) \dot{q}_i \dot{q}_k, \quad a_{ik}(\mathbf{q}) = a_{ki}(\mathbf{q}). \quad (2)$$

Предполагается, что при любых значениях $\mathbf{q}$ коэффициенты $a_{ik}(\mathbf{q})$ и их частные производные первого порядка ограничены. Матрица $\mathbf{A}(\mathbf{q}) = \|a_{ik}(\mathbf{q})\|_{i,k=1}^n$, входящая в выражение кинетической энергии механической системы, является для всех $\mathbf{q}$ положительно определенной. Внешние воздействия обуславливают наличие ограниченных обобщенных сил $Q_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$. Обобщенные координаты, в уравнения которых входят управления, обозначим $\|q_v\|_{v=1}^m$, а координаты, в уравнения которых не входят управляющие воздействия, – $\|q_j\|_{j=m+1}^n$. Рассматривается случай, когда число управлений m меньше числа обобщенных координат n , что определяет объект (1) как систему с дефицитом управления.

Множество допустимых управлений формируется как вектор, состоящий из суммы функций $\mathbf{u}(t) = \|u_s(t)\|_{s=1}^n$ в выпуклой области U и содержащий нулевые компоненты для неуправляемых координат:

$$\mathbf{u}(t) \in U = \left\{ u_s(t) : |u_s(t)| \leq h_s, s = \overline{1, n} \right\}. \quad (3)$$

Задача ставится следующим образом: необходимо перевести динамическую систему (1) из заданного начального состояния $t = t_0, \mathbf{q}(t_0), \dot{\mathbf{q}}(t_0)$ в допустимое для (1) – (3) конечное состояние $t = t_1, \mathbf{q}(t_1), \dot{\mathbf{q}}(t_1)$ за интервал времени $[t_0, t_1]$. Требуется найти управление (3), минимизирующее интегральный критерий качества, где подынтегральная функция является выпуклой и положительно определенной:

$$J(\mathbf{q}) = \int_{t_0}^{t_1} F(\mathbf{q}(t)) dt \rightarrow \min. \quad (4)$$

При условии выпуклости целевого функционала (4) применение принципа максимума Понтрягина позволяет построить решение для исходной экстремальной задачи. Однако недостаток полученного таким образом программного управления заключается в низкой робастности: при любом изменении ограничений системы или параметров приходится повторно решать задачу для определения обратной связи.

Существует альтернативный подход, основанный на редукции исходной оптимизационной задачи к изопериметрической [4]. Классическая изопериметрическая задача в вариационном исчислении требует минимизации функционала при наличии интегрального ограничения. В данном случае исходный критерий качества (4) дополняется интегралом действия (или другим инвариантом динамической системы) как изопериметрическим условием. В результате исходная задача Лагранжа с нелинейными дифференциальными связями сводится к задаче на условный экстремум функционала с интегральной связью. Это позволяет применить метод неопределенных множителей Лагранжа и получить необходимые условия экстремума. Такой подход дает возможность получить приближенное решение в смысле минимума расширенного функционала на основе аддитивной свертки исходного критерия (4) и интеграла действия, что позволяет определить структуру множества квазиоптимальных решений, представленных в форме синтеза.

Метод синтеза квазиоптимальных систем с дефицитом управления представлен в исследованиях [13, 14]. Он основан на редукции задачи Лагранжа и применении принципа декомпозиции, что позволяет получить структуру квазиоптимальной системы, управляемой по критерию (4).

Положим, что критерий качества (4) определяется следующей целевой функцией:

$$F(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n k_s q_s^2 = \mathbf{q}^T \mathbf{K} \mathbf{q},$$

где $\mathbf{K}$ – положительно определенная диагональная матрица; k_s – заданные весовые коэффициенты.

Известно [4], что решение задачи структурного синтеза закона управления имеет вид

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T}{\partial q_s} = -h_s \text{sign}(\Psi_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))_s, \quad s = \overline{1, n},$$

где $\Psi_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mu_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{q}_s + \frac{\partial F(\mathbf{q})}{\partial q_s}$ определяет поверхность переключения; $\mu_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – знакопостоянная

синтезирующая функция; $[\lambda(A - T) + F]_t^{t_1} = 0, \quad t \in [t_0, t_1]$ – требование выполнения энергетического баланса на экстремальной траектории; A – работа обобщенных сил; λ – множитель Лагранжа.

Поверхность переключения с точностью до неопределенных множителей λ и вектора ε для заданной выше целевой функции принимает вид [21]

$$\Psi_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \left[k_s q_s + \lambda \frac{|\dot{q}_s| \dot{q}_s}{a_{ss}^{-1}(\mathbf{q}) \left[|q_s| + k_s^{-1} \sum_{k=1}^n r_{ks}^{-1} \varepsilon_k \right]} \right], \quad s, k = \overline{1, n},$$

где r_{ks}^{-1} – элементы матрицы учета кинематической связи при построении линии переключения.

Обозначим $\alpha_{1s} = k_s, \alpha_{2s} = \frac{\lambda}{a_{ss}^{-1}(\mathbf{q})}, \alpha_{3s} = k_s^{-1} \sum_{k=1}^n r_{ks}^{-1} \varepsilon_k$, тогда

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T}{\partial q_s} &= Q_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + u_s, \\
u_s &= -h_s \operatorname{sign} \left[\sum_{k=1}^n a_{sk}^{-1}(\mathbf{q}) \Psi_s(q_s, \dot{q}_s) \right], \quad s = \overline{1, m}, \\
u_s &= 0, \quad s = \overline{m+1, n}, \\
\Psi_s(q_s, \dot{q}_s) &= \left[\alpha_{1s} q_s + \alpha_{2s} \frac{|\dot{q}_s| \dot{q}_s}{|q_s| + \alpha_{3s}} \right], \\
s &= \overline{1, n}.
\end{aligned} \tag{5}$$

Построение модели системы управления движением поезда

Движение поезда может быть описано уравнением следующего вида [22]:

$$m\ddot{s} = F - R,$$

где m – масса поезда; s – горизонтальное перемещение поезда; R – равнодействующая сил основного и дополнительного сопротивления движению; F – сила тяги/электрического торможения, развиваемая локомотивом.

В связи с тем что полная модель тягового электропривода, состоящая из электрической и механической частей, является довольно сложной для прямого применения в задаче синтеза квазиоптимального регулятора, используем аппроксимацию этой модели. Экспериментальные данные, полученные на обкатном кольце полигона Щербинка, позволяют представить модель тягового электропривода в следующем виде [22]:

$$T_1 T_2 \ddot{M} + (T_1 + T_2) \dot{M} + M = k_u u,$$

где T_1, T_2 – постоянные времени; M – момент вала тягового электропривода; k_u – коэффициент, связывающий напряжение на тяговом электроприводе и развиваемый момент.

Таким образом, модель всей системы движения поезда может быть описана уравнениями Лагранжа второго рода в обобщенных координатах $q = \begin{bmatrix} s \\ M \end{bmatrix}$:

$$\begin{cases} m\ddot{s} = k_m M - R, \\ T_1 T_2 \ddot{M} = -(T_1 + T_2) \dot{M} - M + k_u u, \end{cases} \tag{6}$$

где u – управление тягового электропривода; k_m – коэффициент, связывающий момент на валу тягового электропривода и развиваемую силу тяги.

Система функционирует в условиях ограничений на силу тяги $|k_m M| \leq F_{\max}$ в соответствии с тяговой характеристикой поезда. Ограничения на ускорение поезда $\ddot{s}_{\min} \leq \ddot{s} \leq \ddot{s}_{\max}$ определяются техническими требованиями.

Величина силы сопротивления определяется известной зависимостью [23]

$$R(\dot{s}) = P w_l + Q w_c = P(a_p + b_p \dot{s} + c_p \dot{s}^2) + Q(a_Q + b_Q \dot{s} + c_Q \dot{s}^2),$$

где P – вес локомотива; Q – вес состава; w_l – удельное сопротивление локомотива; w_c – удельное сопротивление состава; $a_p, b_p, c_p, a_Q, b_Q, c_Q$ – коэффициенты, зависящие от характеристик поезда.

Рассматривается сценарий, когда скорость движения поезда отклоняется от заданного режима в силу априорно неизвестных воздействий. Процесс достижения требуемого режима после отклонения считается завершённым при достижении графика движения $v_{\text{ит}}$ при требуемой скорости $v_{\text{ц}}$. В соответствии с этой целью управление синтезируется так, чтобы интегральный критерий следующего вида достигал минимума:

$$J = \int_0^{t_k} (s - v_{ц}t)^2 dt \rightarrow \min. \quad (7)$$

Построение нечеткого регулятора скоростью поезда

Повышение робастности системы, ее быстродействия и уменьшение перерегулирования могут быть достигнуты за счет использования нечеткой логики [19] для параметрического синтеза закона управления (5).

В разрабатываемом нечетком регуляторе определяются следующие входные и выходные переменные:

– вход 1: $\Delta s = s - v_{ц}t$ (отклонение по координате);

– вход 2: $\Delta \dot{s} = \dot{s} - v_{ц}$ (отклонение по скорости);

– выход: значение параметра регулятора α_k , который влияет на форму поверхности переключения.

Структура нечеткого контроллера реализована на основе TS-модели типа MISO (много входов – один выход). База правил формируется для каждого параметра $\alpha_k, k = \overline{1, 6}$ в управлении (5) с использованием продукционных правил вида:

R^1 : если Δs есть A_1 и $\Delta \dot{s}$ есть B_1 , то $\alpha_k = f_1$, иначе

R^2 : если Δs есть A_2 и $\Delta \dot{s}$ есть B_1 , то $\alpha_k = f_2$, иначе

...

R^{25} : если Δs есть A_5 и $\Delta \dot{s}$ есть B_5 , то $\alpha_k = f_{25}$,

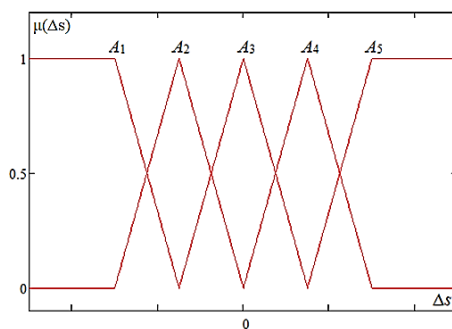
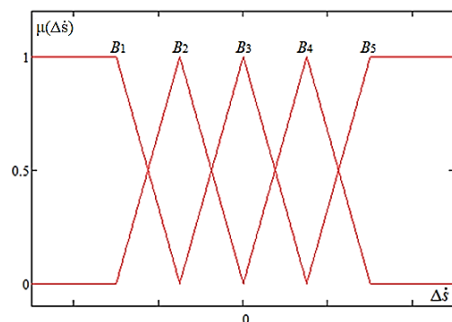
где $A_i, B_i, i = \overline{1, 5}$ – области отклонения s и $\dot{s}$ соответственно, определяемые функциями принадлежности; $f_j, j = \overline{1, 25}$ – оптимальные по критерию (7) значения параметра α_k для конкретных отклонений.

Значения f_j (таблица) были определены в результате серии численных экспериментов с использованием метода скользящей оптимизации. Для каждой комбинации лингвистических термов A_i и B_j (дискретные значения ошибок) решалась задача параметрической оптимизации по критерию (7) с помощью градиентного метода. Полученные таким образом оптимальные значения α_k фиксировались как константы f_j . Такой подход гарантирует воспроизводимость результатов и позволяет использовать базу правил без дополнительной настройки.

База правил параметра α_k

Ошибка пути Δs Ошибка скорости $\Delta \dot{s}$		← +		0	- →	
		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
↑ +	B_1	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
	B_2	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}
○	B_3	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}
↓ -	B_4	f_{16}	f_{17}	f_{18}	f_{19}	f_{20}
	B_5	f_{21}	f_{22}	f_{23}	f_{24}	f_{25}

Для фаззификации входных переменных выбраны традиционно используемые для задач управления треугольные функции принадлежности [24]. На рис. 1, 2 представлены функции принадлежности для ошибки пути Δs и ошибки скорости $\Delta \dot{s}$ соответственно.

Рис. 1. Функции принадлежности для Δs Рис. 2. Функции принадлежности для $\Delta \dot{s}$

$$\mu(\Delta s) = \begin{cases} 0, & \Delta s < a_1 \text{ или } \Delta s > c_1 \\ \frac{\Delta s - a_1}{b_1 - a_1}, & a_1 \leq \Delta s \leq b_1 \\ \frac{c_1 - \Delta s}{c_1 - b_1}, & b_1 \leq \Delta s \leq c_1 \end{cases}, \quad \mu(\Delta \dot{s}) = \begin{cases} 0, & \Delta \dot{s} < a_2 \text{ или } \Delta \dot{s} > c_2 \\ \frac{\Delta \dot{s} - a_2}{b_2 - a_2}, & a_2 \leq \Delta \dot{s} \leq b_2 \\ \frac{c_2 - \Delta \dot{s}}{c_2 - b_2}, & b_2 \leq \Delta \dot{s} \leq c_2 \end{cases} \quad (8)$$

где $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ – параметры, определяющие границы функций принадлежности. Композиция функций принадлежности (8) $\mu' = \mu(\Delta s) \wedge \mu(\Delta \dot{s})$ определяет границы на фазовой плоскости. Для получения конкретного значения параметра $\alpha_k, k = \overline{1, 6}$ используется метод взвешенного среднего, являющийся стандартным для TS-моделей:

$$\alpha_k = \frac{\sum_{j=1}^{25} \mu'_j f_j}{\sum_{j=1}^{25} \mu'_j}.$$

Анализ эффективности нечеткого регулятора

Рассмотрим пример моделирования движения пассажирского электровоза ЭП20 в условиях неизвестных возмущений с характерными для его модели параметрами [22]. Численное моделирование проводится на интервале времени $t = [0, 100]$ с при шаге $\Delta t = 0,1$ с, значениях параметров $k_m = 6,36 \frac{1}{\text{М}}$, $k_u = 50 \frac{\text{кг} \cdot \text{М}^2}{\text{В} \cdot \text{с}^2}$, $T_1 = 1,44$ с, $T_2 = 2,53$ с, $m = 779$ т, $P = 1265$ кН, $Q = 6370$ кН, $F_{\max} = 350$ кН, $a_p = 2,4$, $b_p = 0,011 \frac{\text{с}}{\text{М}}$, $c_p = 0,00035 \frac{\text{с}^2}{\text{М}}$, $a_Q = 0,75$, $b_Q = 0,0011 \frac{\text{с}}{\text{М}}$, $c_Q = 0,000019 \frac{\text{с}^2}{\text{М}}$, $\ddot{s}_{\max} = 0,7 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$, $\ddot{s}_{\min} = -1,5 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$,

начальных значениях $s(0) = 0$ м, $\dot{s}(0) = 17 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $M(0) = \frac{R(\dot{s}(0))}{k_m}$, $\dot{M}(0) = 0 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3}$ и целевом значении скорости для достижения требуемого режима движения $v_{\text{ц}} = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Процесс достижения требуемого режима ведения поезда после отклонения в соответствии с техническими характеристиками и нормативными требованиями будем считать завершенным при достижении отклонения Δs в пределах ± 5 м и $\Delta \dot{s}$ в пределах $\pm 0,8$ м/с. Необходимо обеспечить достижение требуемого режима ведения поезда при условии, что критерий эффективности (7) достигает минимума.

Предлагаемый закон управления (5) в соответствии со структурой модели (6) и критерием (7) принимает вид

$$u_{\text{cmp}} = \text{sat} \left[\frac{k_m}{m} \left(\alpha_1 (s - v_{\text{ц}} t) + \alpha_2 \frac{|\dot{s} - v_{\text{ц}}| (\dot{s} - v_{\text{ц}})}{|s - v_{\text{ц}} t| + \alpha_3} \right) + \frac{k_u}{T_1 T_2} \left(\alpha_4 M + \alpha_5 \frac{|\dot{M}| \dot{M}}{|M| + \alpha_6} \right) \right], \quad (9)$$

где sat – функция насыщения.

Для анализа эффективности разработанного нечеткого контроллера проведем сравнение результатов моделирования с законом управления на основе прямого применения принципа декомпозиции [3]:

$$u_{\text{pyat}} = \text{sat} \left[\frac{k_m}{m} (\alpha_{s1} (s - v_{\text{ц}} t) + \alpha_{s2} (\dot{s} - v_{\text{ц}})) + \frac{k_u}{T_1 T_2} (\alpha_{M1} M + \alpha_{M2} \dot{M}) \right]. \quad (10)$$

Из-за нелинейности законов управления (9) и (10) их параметрический синтез представляет сложную задачу, в связи с чем расчет параметров производится с помощью предложенной выше схемы нечетко-логического вывода на всем диапазоне априорно неизвестных отклонений.

Результаты моделирования для вышеописанного варианта исходных данных представлены на рис. 3, 4, где графики изменения параметров движения, полученные с помощью предлагаемого закона управления (9), изображены сплошной линией, а с помощью известного закона управления (10) – штрихом.

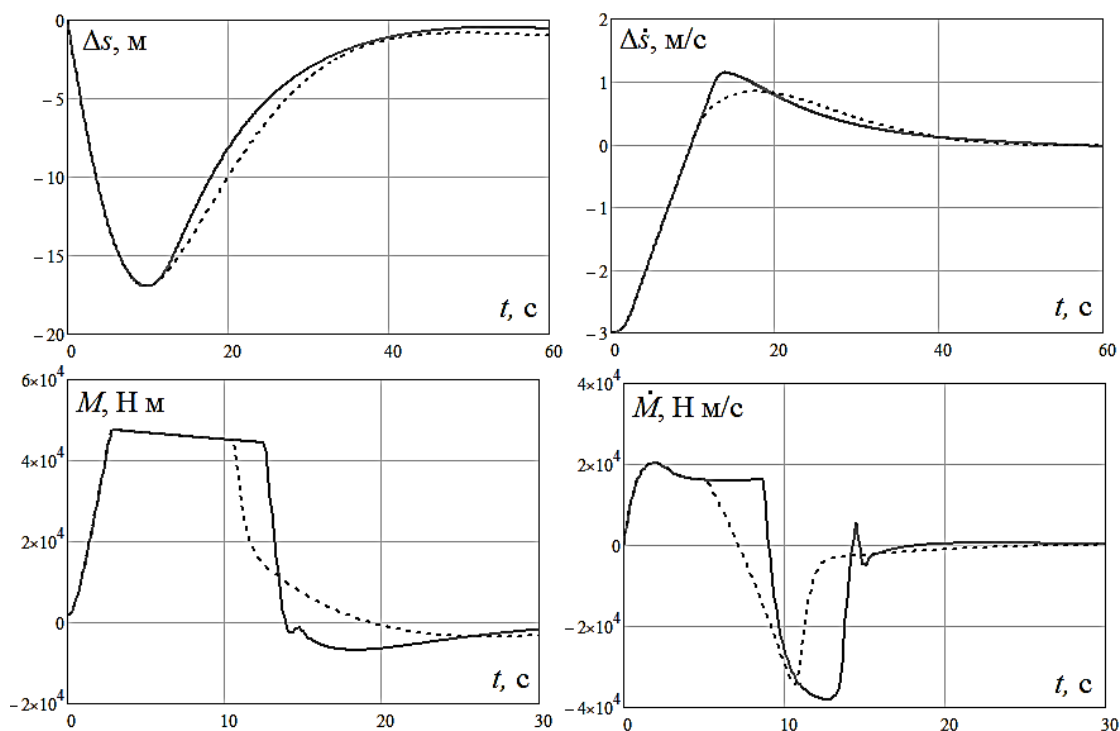


Рис. 3. Переходные процессы управления движением поезда

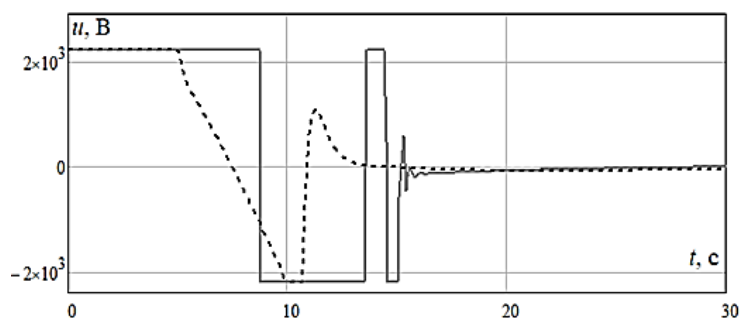


Рис. 4. Величина управляющего воздействия

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что синтезированный закон управления (9) дает возможность повысить качество регулирования скорости поезда в сравнении с известным законом управления (10) на 11,2 % по критерию (7).

Заключение

Анализ результатов проведенного численного моделирования показывает, что модель нечеткого квазиоптимального регулятора с предлагаемым законом управления позволяет повысить качество управления скоростью поезда по критерию минимума отклонения от графика движения на 11,2 % в сравнении с известным законом, основанным на прямом применении принципа декомпозиции в условиях априорной неопределенности.

Использование аппарата нечетко-логического вывода позволяет решить вопрос выбора параметров регулятора и демонстрирует возможность интеллектуализации алгоритмов управления на основе экспериментальных данных, что позволяет обеспечить повышение качества функционирования систем автоматического управления скоростью поезда в условиях неопределенности. При этом создание интеллектуальных алгоритмов управления торможением и стабилизации, способных в режиме реального времени адаптироваться к изменяющимся условиям и выбирать оптимальный режим ведения поезда, является исключительно актуальным для высокоскоростных поездов и соответствует приоритетному направлению развития интеллектуальных транспортных систем.

Заметим, что в данной работе при моделировании движения поезда использовалась упрощенная модель, не учитывающая профиль пути и внешние воздействия, что определяет перспективы дальнейших исследований и анализа функционирования такой системы в более сложных условиях.

Также следует отметить, что для механических систем, отличающихся существенной нелинейностью модели движения, используемый подход синтеза управления может повысить не только качество управления по заданному критерию, но и увеличить область устойчивости при больших отклонениях от заданного режима движения [13, 14].

Кроме системы управления скоростью поезда, разработанный нечеткий регулятор имеет перспективы применения в системах управления различных видов транспортных средств, например, при управлении угловой ориентацией мультироторных беспилотных летательных аппаратов, при управлении различными видами роботов и прочих механических систем с дефицитом управляющих воздействий, которые могут быть описаны уравнениями Лагранжа второго рода.

Список литературы

- 1 UDE-based dynamic surface control for quadrotor drone attitude tracking under nonideal actuators / L. Xu, K. Qin, F. Tang [et al.] // Drones. – 2023. – Vol. 7, No. 5. – P. 305. – DOI 10.3390/drones7050305.
- 2 Le, H. D. A novel hierarchical recursive nonsingular terminal sliding mode control for inverted Pendulum / H. D. Le, T. Nestorović // Actuators. – 2023. – Vol. 12. – P. 462. – DOI 10.3390/act12120462.
- 3 Пятницкий, Е. С. Принцип декомпозиции в управлении механическими системами / Е. С. Пятницкий // Доклады Академии наук СССР. – 1988. – Т. 300, № 2. – С. 300–303.

References

- 1 UDE-based dynamic surface control for quadrotor drone attitude tracking under non-ideal actuators / L. Xu, K. Qin, F. Tang [et al.] // Drones. – 2023. – Vol. 7, No. 5. – P. 305. – DOI 10.3390/drones7050305.
- 2 Le, H. D. A novel hierarchical recursive nonsingular terminal sliding mode control for inverted Pendulum / H. D. Le, T. Nestorović // Actuators. – 2023. – Vol. 12. – P. 462. – DOI 10.3390/act12120462.
- 3 Pyatnitsky, E. S. Decomposition principle in the control of mechanical systems / E. S. Pyatnitsky // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1988. – Vol. 300, No. 2. – P. 300–303.

4 **Костоглотов, А. А.** Метод квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче с использованием асинхронного варьирования / А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2021. – Т. 6, № 6. – С. 3–12. – DOI 10.31857/S0002338821060111.

5 A GoA4 control architecture for the autonomous driving of high-speed trains over ETCS : design and experimental validation / L. Barruffo, B. Caiazzo, A. Petrillo, S. Santini // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2024. – Vol. 25, No. 6. – P. 5096–5111. – DOI 10.1109/TITS.2023.3338295.

6 **Liang, B.** Fractional order nonsingular terminal sliding mode cooperative fault-tolerant control for high-speed trains with actuator faults based on grey wolf optimization / B. Liang, T. Zhang // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 63932–63946. – DOI 10.1109/ACCESS.2023.3288902.

7 **Zhu, Y.** A loss-model-based efficiency optimization control method for induction traction system of high-speed train under emergency self-propelled mode / Y. Zhu, Y. Li // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. – 2024. – Vol. 8, No. 2. – P. 227–239.

8 **Баранов, Л. А.** Энергооптимальное управление движением поезда с рекуперативным тормозом при учете ограничений на фазовую координату / Л. А. Баранов, И. С. Мелешин, Л. М. Чинь // Наука и техника транспорта. – 2010. – № 4. – С. 19–29. – ISSN 2074-9325.

9 Электровоз с плавным управлением в режимах независимого и последовательного возбуждения тяговых электродвигателей / Н. Л. Михальчук, О. Е. Пудовиков, А. Н. Савоскин, А. А. Чучин // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 9. – С. 35–39. – ISSN 0044-4448.

10 Внедрение системы автоведения для повышения точности управления и энергоэффективности высокоскоростного электропоезда / О. С. Валинский, А. Н. Марикин, Н. П. Калинин, Е. В. Суханов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2025. – Т. 22, № 1. – С. 7–18. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-1-7-18.

11 **Zhang, Z.** Energy-efficient driving strategy for high-speed trains with considering the checkpoints / Z. Zhang, Y. Cao, S. Su // Chinese Journal of Electronics. – 2024. – Vol. 33, No. 3. – P. 847–858.

12 Оптимизация управления движением поездов / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелешин, Л. М. Чинь ; под редакцией Л. А. Баранова. – Москва : МИИТ, 2011. – 164 с. – ISBN 978-5-7876-0151-0.

4 **Kostoglotov, A. A.** Method of quasi-optimal synthesis of control laws based on reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric problem using asynchronous variation / A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko // Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya (Journal of Computer and System Sciences International). – 2021. – Vol. 6, No. 6. – P. 3–12. – DOI 10.31857/S0002338821060111.

5 A GoA4 control architecture for the autonomous driving of high-speed trains over ETCS : design and experimental validation / L. Barruffo, B. Caiazzo, A. Petrillo, S. Santini // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2024. – Vol. 25, No. 6. – P. 5096–5111. – DOI 10.1109/TITS.2023.3338295.

6 **Liang, B.** Fractional order nonsingular terminal sliding mode cooperative fault-tolerant control for high-speed trains with actuator faults based on grey wolf optimization / B. Liang, T. Zhang // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 63932–63946. – DOI 10.1109/ACCESS.2023.3288902.

7 **Zhu, Y.** A loss-model-based efficiency optimization control method for induction traction system of high-speed train under emergency self-propelled mode / Y. Zhu, Y. Li // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. – 2024. – Vol. 8, No. 2. – P. 227–239.

8 **Baranov, L. A.** Energy-optimal train motion control with regenerative braking under phase coordinate constraints / L. A. Baranov, I. S. Meleshin, L. M. Chin // Science and Technology in Transport. – 2010. – No. 4. – P. 19–29. – ISSN 2074-9325.

9 Electric locomotive with smooth control in independent and sequential excitation modes of traction motors / N. L. Mikhalechuk, O. E. Pudovikov, A. N. Savoskin, A. A. Chuchin // Railway Transport. – 2022. – No. 9. – P. 35–39. – ISSN 0044-4448.

10 Implementation of an automatic driving system to improve control accuracy and energy efficiency of a high-speed electric train / O. S. Valinsky, A. N. Marikin, N. P. Kalinin, E. V. Sukhanov // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2025. – Vol. 22, No. 1. – P. 7–18. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-1-7-18.

11 **Zhang, Z.** Energy-efficient driving strategy for high-speed trains with considering the checkpoints / Z. Zhang, Y. Cao, S. Su // Chinese Journal of Electronics. – 2024. – Vol. 33, No. 3. – P. 847–858.

12 Optimization of train traffic control / L. A. Baranov, E. V. Erofeev, I. S. Meleshin, L. M. Chin ; edited by L. A. Baranov. – Moscow : MIIT, 2011. – 164 p. – ISBN 978-5-7876-0151-0.

13 **Костоглотов, А. А.** Метод синтеза квазиоптимальных систем с дефицитом управления на базе редукции задачи Лагранжа / А. А. Костоглотов, В. О. Зехцер // Информационно-управляющие системы. – 2024. – № 4 (131). – С. 40–49. – DOI 10.31799/1684-8853-2024-4-40-49.

14 **Костоглотов, А. А.** Квазиоптимальный закон управления для лагранжевых систем с дефицитом управляющих воздействий / А. А. Костоглотов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2024. – № 3 (223). – С. 4–14. – DOI 10.18522/1026-2237-2024-3-4-14.

15 Hybrid PI and fuzzy logic control for energy optimization in train operations / H.-H. Cho [et al.] // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 59366–59376.

16 Event-triggered robust fuzzy control of high-speed trains under virtual coupling operational scenarios / M. Zhu [et al.] // IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2026. – Vol. 7. – P. 875–890.

17 On train dynamics modeling based on parameter fuzzy identification method / R. Li [et al.] // International Journal of Fuzzy Systems. – 2026. – Vol. 28. – P. 1030–1041.

18 **Wang, X.** Stability-enhanced model predictive control for urban rail transit train / X. Wang, K. Xing, J. Wang // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 52302–52314.

19 Построение баз знаний нечетких регуляторов: превосходство интеллектуальных технологий на основе мягких вычислений для моделирования управления неустойчивыми динамическими системами / П. В. Зрелов, Д. П. Зрелова, О. Ю. Тятюшкина, С. В. Ульянов // Нечеткие системы и мягкие вычисления. – 2024. – Т. 19, № 1. – С. 5–46. – DOI 10.26456/fssc92.

20 Моделирование нечёткой системы управления электроприводом постоянного тока на основе векторно-матричного описания / С. П. Черный, А. В. Бузикаева, А. И. Годяев, Ю. А. Давыдов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2023. – № 3 (67). – С. 35–41. – DOI 10.17084/20764359-2023-67-35.

21 Метод синтеза нелинейных квазиоптимальных законов управления многомерными системами на основе условия максимума функции обобщенной мощности и анализа пучка квадратичных форм / В. О. Зехцер, А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко, А. А. Агапов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2023. – № 4 (220). – С. 34–42. – DOI 10.18522/1026-2237-2023-4-34-42.

13 **Kostoglotov, A. A.** Synthesis method of quasi-optimal underactuated systems based on the reduction of Lagrange problem / A. A. Kostoglotov, V. O. Zekhtser // Information and Control Systems. – 2024. – No. 4 (131). – P. 40–49. – DOI 10.31799/1684-8853-2024-4-40-49.

14 **Kostoglotov, A. A.** Quasi-optimal control law for Lagrangian underactuated systems / A. A. Kostoglotov // Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences Series. – 2024. – No. 3 (223). – P. 4–14. – DOI 10.18522/1026-2237-2024-3-4-14.

15 Hybrid PI and fuzzy logic control for energy optimization in train operations / H.-H. Cho [et al.] // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 59366–59376.

16 Event-triggered robust fuzzy control of high-speed trains under virtual coupling operational scenarios / M. Zhu [et al.] // IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2026. – Vol. 7. – P. 875–890.

17 On train dynamics modeling based on parameter fuzzy identification method / R. Li [et al.] // International Journal of Fuzzy Systems. – 2026. – Vol. 28. – P. 1030–1041.

18 **Wang, X.** Stability-enhanced model predictive control for urban rail transit train / X. Wang, K. Xing, J. Wang // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 52302–52314.

19 Building knowledge bases of fuzzy controllers: the superiority of intelligent technologies based on soft computing for modeling control of unstable dynamic systems / P. V. Zrelov, D. P. Zrelova, O. Yu. Tyatyushkina, S. V. Ulyanov // Fuzzy Systems and Soft Computing. – 2024. – Vol. 19, No. 1. – P. 5–46. – DOI 10.26456/fssc92.

20 Modeling of a fuzzy control system for a DC electric drive based on vector-matrix description / S. P. Cherny, A. V. Buzikaeva, A. I. Godyaev, Yu. A. Davydov // Scientific Notes of Komсомolsk-on-Amur State Technical University. – 2023. – No. 3 (67). – P. 35–41. – DOI 10.17084/20764359-2023-67-35.

21 Synthesis method of nonlinear quasi-optimal control laws for multidimensional systems based on the maximum condition of the generalized power function and the analysis of a beam of quadratic forms / V. O. Zekhtser, A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko, A. A. Agapov // Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences Series. – 2023. – No. 4 (220). – P. 34–42. – DOI 10.18522/1026-2237-2023-4-34-42.

22 **Притыкин, Д. Е.** Метод обратных задач динамики для синтеза регулятора скорости магистрального электровоза / Д. Е. Притыкин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 5. – С. 48–54. – ISSN 0136-3360.

23 **Гребенюк, П. Т.** Тяговые расчеты : справочник / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, А. И. Скворцова ; под редакцией П. Т. Гребенюка. – Москва : Транспорт, 1987. – 272 с.

24 Моделирование развитой нечёткой системы управления многосвязным объектом в условиях многокритериальности / С. П. Черный [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2023. – № 3 (67). – С. 62–69. – DOI 10.17084/20764359-2023-67-62.

22 **Pritykin, D. E.** Method of inverse dynamics problems for synthesis of a speed controller for a mainline electric locomotive / D. E. Pritykin // Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics. – 2012. – No. 5. – P. 48–54. – ISSN 0136-3360.

23 **Grebenyuk, P. T.** Traction calculations : handbook / P. T. Grebenyuk, A. N. Dolganov, A. I. Skvortsova ; edited by P. T. Grebenyuk. – Moscow : Transport, 1987. – 272 p.

24 Modeling of an advanced fuzzy control system for a multivariable object under multicriteria conditions / S. P. Cherny [et al.] // Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. – 2023. – No. 3 (67). – P. 62–69. – DOI 10.17084/20764359-2023-67-62.

V. O. Zekhtser, A. A. Kostoglotov, X. Wu, B. Li

SYNTHESIS OF A QUASI-OPTIMAL FUZZY CONTROLLER MODEL UNDER A PRIORI UNCERTAINTY IN INTELLIGENT TRANSPORT UNDERACTUATED SYSTEMS

Abstract. The research paper presents the synthesis of a fuzzy quasi-optimal controller model and an analysis of its effectiveness compared to a known train speed controller for short-term deviations from the specified operating mode. The task of controlling an underactuated system is of particular importance for railway transport, especially for high-speed transportation. Mechanical systems as control objects are essentially nonlinear dynamical systems of high order. In addition, the complexity of optimizing the operating modes of such systems is due to the fact that even detailed modeling does not accurately predict the cumulative effect of all dynamic factors acting on a dynamic system under operating conditions. Traditionally used in practice linear control laws with constant coefficients are designed to stabilize only one specific mode of motion, which makes them ineffective in conditions of control deficit and a priori uncertainty. Using the reduction of the Lagrange optimization problem to the isoperimetric one makes it possible to obtain a quasi-optimal solution to the structural synthesis problem, which increases control efficiency compared to known methods. The use of the fuzzy logic apparatus allows for parametric synthesis of control, providing adaptability to a priori uncertain operating conditions.

Keywords: quasi-optimal control law, reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric one, underactuated system, train speed control, fuzzy logic.

For citation: Synthesis of a quasi-optimal fuzzy controller model under a priori uncertainty in intelligent transport underactuated systems / V. O. Zekhtser, A. A. Kostoglotov, X. Wu, B. Li // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 8–20. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_8.

Сведения об авторах

Зехцер Владимир Олегович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Связь на железнодорожном
транспорте»,
документовед,
e-mail: vova-zehcer@yandex.ru

Костоглотов Андрей Александрович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),

Information about the authors

Zekhtser Vladimir Olegovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Communication on Railway Transport”,
Document Specialist,
e-mail: vova-zehcer@yandex.ru

Kostoglotov Andrey Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Communication on Railway Transport”,

кафедра «Связь на железнодорожном транспорте»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: kostoglotov@me.com

У Ся

Пекинский технологический институт,
Школа компьютерных наук и технологий,
доктор психологических наук, профессор,
e-mail: wuxia@bit.edu.cn

Ли Бэньжань

Shandong Big Data Medical Technology Co.,
Ltd,
генеральный директор,
e-mail: libenran@chinesehis.com

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Chair,
e-mail: kostoglotov@me.com

Wu Xia

Beijing Institute of Technology,
School of Computer Science and Technology,
Doctor of Psychological Sciences, Professor,
e-mail: wuxia@bit.edu.cn

Li Benran

Shandong Big Data Medical Technology Co.,
Ltd,
General Director,
e-mail: libenran@chinesehis.com