

Г. М. Менакер, О. Е. Пудовиков

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИМ ТОРМОЗОМ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА *

Аннотация. Предложена функциональная схема системы автоматического управления пневматическим тормозом грузового поезда с возможностью идентификации реальных тормозных параметров поезда и сопротивления движению, которая наряду с остальными средствами автоматического управления поездом обеспечивает безопасность перевозок на железнодорожном транспорте. В качестве алгоритма идентификации тормозных параметров поезда, а также сопротивления движению использован расширенный фильтр Калмана – EKF. Приведены результаты моделирования с использованием алгоритма EKF и без него. Показано преимущество использования предлагаемой системы в части обеспечения высокого качества управления посредством увеличения промежутков между торможениями на «вредном» спуске, что способствует повышению участковой скорости движения, а также достаточно точной реализации алгоритма прицельного торможения.

Ключевые слова: автоматическое управление, пневматический тормоз, продольные математическое моделирование, идентификация параметров.

Для цитирования: Менакер, Г. М. Адаптивная система автоматического управления пневматическим тормозом грузового поезда / Г. М. Менакер, О. Е. Пудовиков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 132–144. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_132.

Во многих странах мира железнодорожные дороги занимают ключевую позицию в транспортной системе. В Российской Федерации более половины всех перевозок в стране приходится на долю железнодорожного транспорта. Вместе с этим, из-за увеличения объема перевозок на железных дорогах некоторые линии достигли предела пропускной и провозной способности.

Пневматическая тормозная система является важнейшим средством обеспечения безопасности движения поездов, она применяется, самостоятельно или совместно с электродинамическим тормозом локомотива, при выполнении регулировочных и остановочных торможений, а также для поддержания скорости при движении по «вредным» спускам.

Необходимо отметить, что на последовательность смены технологических операций по управлению тормозной системой накладываются строгие порядковые и временные ограничения [1], усложняющие управление ею и оказывающие влияние на ряд показателей, характеризующих эффективность перевозочного процесса. Нарушение данной последовательности создает предпосылки к возникновению ситуаций, создающих угрозу безопасности движению поездов ввиду снижения эффективности тормоза из-за истощения.

Повышению экономической эффективности железнодорожного транспорта и безопасности движения поездов способствует повсеместное внедрение средств автоматизации технологических процессов и интеллектуальных систем управления. Примером могут служить многоконтурные системы автоматического ведения поездов (САВП), которые в настоящее время нашли широкое применение. Внешним контуром таких систем является контур регулирования времени хода, формирующий траекторию движения поезда, рациональную с точки зрения расхода топливно-энергетических ресурсов при условии соблюдения заданного времени хода поезда, а внутренними контурами – система автоматического управления скоростью движения, формирующая задание для системы автоматизированного тягового электропривода, и система автоматического управления тормозной системой [2, 3], исполняющие заданные контуром регулирования времени хода режимы и скорости движения поезда.

Вопросами автоматизации управления торможением занимались Л. А. Баранов [2], В. И. Головин [11], Л. М. Жебрак [14], Ю. Г. Кутыев [11], Е. В. Комков [12], М. Ю. Капустин [13], Б. Д. Никифоров [11], О. Е. Пудовиков [3–5], А. Н. Савоськин [2,15] и другие отечественные и зарубежные ученые.

* Работа выполнена за счёт бюджетного финансирования в рамках государственного задания от 20.03.2025 № 103-00001-25-02.

Ранее авторами настоящей работы была предложена система автоматизации управления пневматическим тормозом, позволяющая выполнять поддержание заданной скорости на спусках, а также прицельное торможение в заданные координаты [4, 5]. В этой системе для выбора точки смены режима работы пневматического тормоза использованы расчетные значения параметров тормозной системы (расчетные тормозной коэффициент и нажатие). Данная система не позволяет обеспечить достаточную точность управления при объективно существующем отклонении фактических параметров тормозной системы, а также параметров сопротивления движению вагонов поезда от расчетных значений и их изменение в процессе эксплуатации, хотя эти факторы оказывают существенное влияние на качество управления в части точности поддержания скорости и выбора точки начала торможения. Для повышения качества управления вышеописанная система, принятая в качестве прототипа, дополнена подсистемами идентификации параметров пневматического тормоза и адаптации параметров системы автоматического управления к фактическим параметрам тормозной системы. Функциональная схема системы автоматического управления приведена на рис. 1.

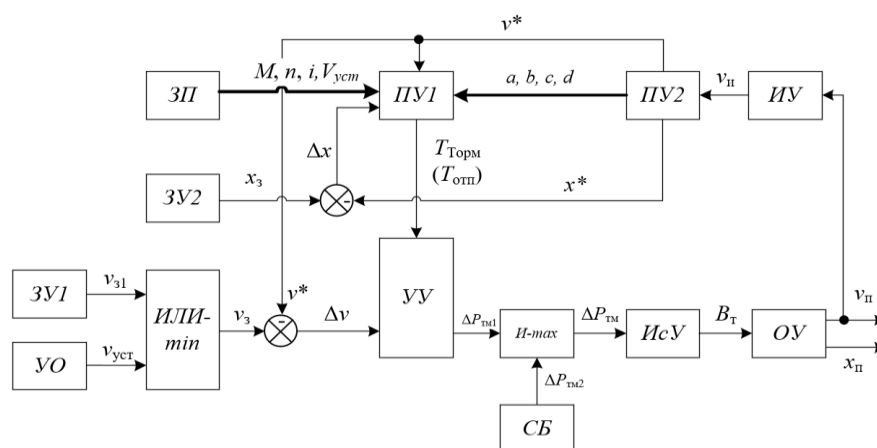


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического управления пневматическим тормозом

Задающее устройство **3У1** вводит в систему сигнал заданной скорости движения v_{31} , поступающий с вышестоящего контура регулирования времени хода САВП, данная величина не может превышать максимально допустимую установленную скорость на перегоне $v_{уст}$, которую задает устройство ограничения (**УО**) системы обеспечения безопасности движения. Устройство **ИЛИ-min** пропускает на свой выход минимальное значение из двух входящих, что позволяет предотвратить превышение максимально допустимого по условиям безопасности движения значения скорости. С выхода устройства **ИЛИ-min** сигнал поступает на устройство сравнения, в котором вычисляется рассогласование между величинами заданной скорости движения v_3 и измеренной v^* . Последняя, в свою очередь, поступает с выхода измерительного устройства (**ИУ**), которое представляет собой импульсный датчик скорости. Для предварительной фильтрации шума датчика используется фильтр скользящего среднего, который является частью промежуточного устройства **ПУ2**. Рассогласование Δv поступает на вход устройства управления (**УУ**), выходной сигнал которого представляет собой заданное значение величины изменения давления в тормозной магистрали поезда $\Delta P_{тм1}$. В промежуточном устройстве **ПУ1** производится выбор момента времени начала торможения или отпуска, необходимые для соблюдения ограничений скорости. Для этого в устройстве **ПУ1** осуществляется упреждающий тормозной расчет с использованием «точечной» модели поезда, при выполнении которого учитываются силы сопротивления движению, вычисленные на основании данных, поступающих с электронной карты, и расчетные значения сил торможения [3]. Устройство **И-тах** выбирает наибольшее значение из величин $\Delta P_{тм1}$ и $\Delta P_{тм2}$, поступивших на его входы от устройства управления (**УУ**) и локомотивных устройств систем безопасности (**СБ**) КЛУБ, БЛОК-М соответственно [6]. Исполнительным устройством является пневматическая тормозная система поезда, в модели которой учтены конечная скорость распространения тормозной волны по поезду, время наполнения и опорожнения тормозных цилиндров (ТЦ), задержка срабатывания воздухораспределителей по длине состава по мере удаления от локомотива [6], в качестве модели объекта управления использована многомассовая модель поезда [7].

Для устранения указанных ранее недостатков системы, связанных с недостаточной точностью реализации прицельного торможения из-за отклонения расчетных значений параметров тормозной системы и поезда от их фактических значений, в системе предусмотрена возможность идентификации ряда параметров поезда, а именно величины сопротивления движению поезда и коэффициента трения колодки о колесо, для чего в системе применен алгоритм расширенного фильтра Калмана – ЕKF, позволяющий выполнить оценку фактических параметров тормозной системы [8]. Для фильтрации сигнала скорости, а также адаптации системы автоматического управления пневматическим тормозом (САУ ПТ) к изменяющимся реальным параметрам поезда и пневматического тормоза в системе предусмотрены дополнительные элементы – промежуточное устройство ПУ2, которое выполняет также функцию идентификации параметров тормозной системы, и промежуточное устройство ПУ1, предназначенное для определения точки начала прицельного регулировочного или остановочного торможения поезда.

В промежуточном устройстве ПУ1 выполняется упреждающий тяговый расчет, алгоритмы работы которого и решаемые задачи различаются в зависимости от режима движения поезда.

При прицельном регулировочном торможении осуществляется:

- определение момента начала разрядки тормозной магистрали для предотвращения превышения установленного ограничения скорости, перед которым и выполняется регулировочное торможение;
- определение момента начала отпуска тормозов, который гарантирует соблюдение установленного ограничения скорости (не выше установленного предела), в том числе при многократном торможении при движении по затяжному спуску.

При прицельном остановочном торможении выполняется:

- определение момента начала разрядки тормозной магистрали при выполнении остановочного торможения;
- предотвращение отпуска тормозов в выбранном ранее режиме регулировочного торможения, если это приведет к проезду заданной точки остановки.

Укрупненная схема алгоритма выбора метода выполнения упреждающего расчета для регулировочного или остановочного торможения показана на рис. 2. Для своей работы указанный алгоритм использует данные о текущей скорости v^* и координате поезда $x_{ф}$, а также значение заданной скорости v_3 и целевой точки остановки x_3 .

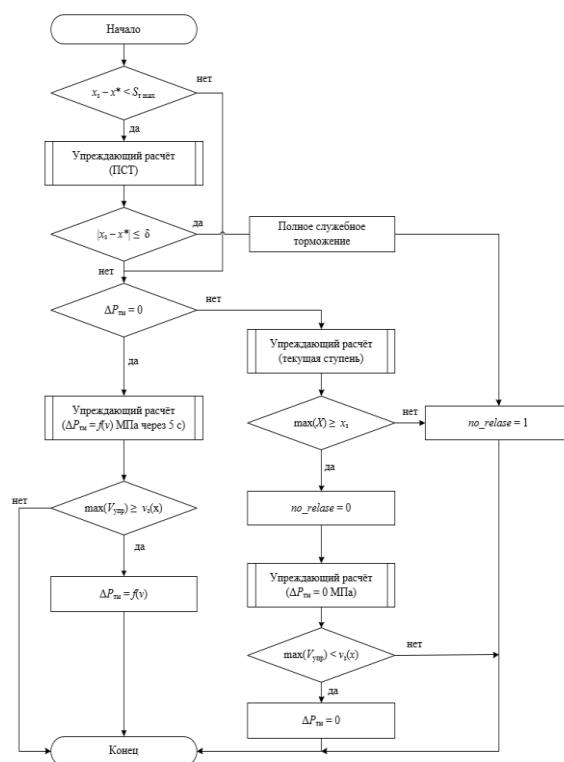


Рис. 2. Алгоритм работы регулировочного и остановочного торможения

Упреждающий расчет для остановочного торможения

В начальный момент времени в системе определяется расстояние до заданной точки остановки поезда: если полученная величина меньше или равна максимально допустимому тормозному пути поезда, выполняется расчет для выбора точки начала торможения со ступенью разрядки тормозной магистрали (ТМ) на 0,1 МПа. Данная ступень выбрана с целью обеспечения плавности торможения и снижения величин продольных сил, возникающих из-за продольных колебаний, при этом проверяется точность определения координаты полученной точки остановки по критерию допустимого отклонения от заданного значения. При выполнении данного условия выполняется разрядка тормозной магистрали в выбранной точке на величину 0,1 МПа, вследствие чего начинается наполнение тормозных цилиндров, тормозная сила растет и скорость снижается до 0 км/ч к заданной координате.

Если в текущий момент времени САУ ПТ находится в режиме регулировочного торможения, то производится упреждающий расчет с учетом текущей ступени разрядки тормозной магистрали; в случае если по результатам упреждающего расчета вычисленная координата точки остановки находится на большем удалении от поезда, чем заданная, поезд продолжает движение в режиме торможения с примененной ранее ступенью до момента начала остановочного торможения.

Упреждающий расчет для регулировочного торможения

Регулировочное торможение выполняется с целью снижения скорости перед местом постоянного или временного ограничения скорости.

В промежуточном устройстве ПУ1 производится упреждающий тормозной расчет для модели поезда с применением вычисленной ступени торможения в соответствии с дифференциальным законом управления, дополненным составляющей, пропорциональной фактическому значению скорости и постоянной составляющей

$$\Delta P_{\text{TM}} = 0,05 + K_1 \frac{d(\Delta v)}{dt} + K_2 v, \quad (1)$$

где K_1 – коэффициент при дифференциальной части закона управления;

K_2 – коэффициент пропорциональности при составляющей фактической скорости движения;

0,05 – постоянная составляющая, соответствующая минимальной ступени торможения.

Составляющая, пропорциональная фактическому значению скорости, введена в закон управления с целью компенсации уменьшения коэффициента трения колодок о колесо при увеличении скорости.

Если полученная при выполнении упреждающего расчета расчетная кривая снижения скорости превышает величину ограничения, перед которым производится торможение, происходит немедленная выработка сигнала торможения, который поступает на вход УУ.

Величина разрядки тормозной магистрали для реального поезда, необходимая для достижения заданной скорости движения, вычисляется в устройстве управления (УУ) в соответствии с законом управления (1), и происходит немедленная разрядка ТМ на вычисленную величину ΔP_{TM} .

Если полученная в результате упреждающего расчета расчетная скорость не превышает установленную на заданном перегоне, поезд продолжает следовать на выезде.

При следовании поезда в режиме торможения система производит расчет с целью определения момента начала отпуска тормозов. Отпуск тормозов выполняется при соблюдении следующих условий:

- минимальное время нахождения на ступени превышает 30 с [1];
- при отпуске тормозов через минимальное время для зарядки ТМ 60 с не будет превышена установленная скорость на заданном перегоне [1];
- отсутствует риск проезда заданной точки остановки.

Необходимость применения остановочного торможения может приводить к конфликтным ситуациям, вызванным нарушением временных ограничений на чередование и длительность операций по управлению тормозными приборами [1]. Например, в процессе регулировочного торможения был сформирован сигнал на отпуск, а через некоторое время наступает необходимость применения остановочного торможения, которое не сможет быть выполнено потому, что не прошел минимальный промежуток времени между торможениями, вследствие чего возможен проезд заданной точки остановки. Для предотвращения подобных ситуаций в системе формируется сигнал «no_release=1», если в результате выполнения упреждающего расчета для остановочного торможения будет обнаружена описанная выше ситуация.

Как было отмечено ранее, при решении тормозной задачи по определению координаты точки

начала торможения для повышения качества управления необходимо учитывать фактическое состояние тормозной системы поезда. Известно, что на эффективность тормоза, а значит, и на длину тормозного пути оказывает влияние величина коэффициента трения между колодками и колесом, механические потери в тормозной системе, состояние пневматической части тормозных приборов и множество других факторов [9], индивидуальных для каждого вагона поезда и изменяющихся в процессе движения поезда. В тяговых расчетах использован усредненный параметр, характеризующий эффективность тормозной системы, а именно расчетный тормозной коэффициент [10], определяемый по формуле:

$$\vartheta_p = \frac{\sum K_p}{Q + P_y}, \quad (2)$$

где $\sum K_p$ – сумма расчетных сил нажатия на тормозные оси поезда, тс;

Q – вес состава;

P_y – вес локомотива.

Неточность в определении расчетного тормозного коэффициента по сравнению с его фактическим значением приведет к значительному отклонению фактического тормозного пути от расчетного значения, а значит, создаст предпосылки к нарушению безопасности движения поездов. Для повышения качества управления в системе предусмотрена процедура идентификации параметров тормозной системы, а также сопротивления движению поезда, для чего использован расширенный фильтр Калмана [8]. Разработанная процедура идентификации является многоступенчатой, предполагающей многократную поэтапную корректировку идентифицированных параметров поезда по результатам последовательно выполняемых торможений.

На первом этапе расчет выполняется для некоторых средних параметров системы, принятых при проектировании. Известно, что расчетный коэффициент трения колодки о колесо определяется по формуле [10]:

$$\varphi_{кр} = a \frac{v + b}{cv + d}, \quad (3)$$

где a, b, c, d – коэффициенты, определяемые опытным путем для каждого типа тормозных колодок.

Указанные коэффициенты являются средними значениями многих опытов. Для конкретного состава они могут заметно отличаться и изменяться даже в течение одной поездки. Очевидно, что знание действительных значений этих коэффициентов повысит качество управления. Для увеличения точности расчета в состав системы введено устройство для идентификации параметров тормозной системы ПУ2. Для их оценки в ПУ2 используется алгоритм ЕKF (расширенный фильтр Калмана) [8].

Рассмотрим работу блока ПУ2. Представим поезд в режиме торможения как систему, эволюционирующую по следующему закону:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), t) + w(t), \\ z(t) = h(x(t), t) + v(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $x(t)$ – вектор состояния системы;

$f(x(t), t)$ – вектор-функция эволюции системы;

$w(t)$ – случайное отклонение модели от действительности с ковариационной матрицей $G(t)$;

$h(t)$ – вектор-функция измерений;

$z(t)$ – выходной измеряемый параметр системы (скорость поезда);

$v(t)$ – случайный шум измерений с ковариационной матрицей $R(t)$.

Вектор состояния системы задан следующим образом:

$$x(t) = \begin{pmatrix} v \\ a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Как видно, первый элемент вектора содержит величину скорости поезда, а оставшиеся представляют собой четыре коэффициента из формулы расчетного коэффициента трения (2) тормозных колодок о колесо.

Уравнение движения поезда как материальной точки в режиме торможения имеет следующий вид:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{(W + B_{\tau})}{M(1 + \gamma)}, \quad (6)$$

где B_{τ} – тормозная сила поезда, определяемая как

$$B_{\tau} = 1000 \varphi_{\text{кр}} K(p_{\text{тн}}), \quad (7)$$

где $K(p_{\text{тн}})$ – суммарная сила нажатия колодок на колеса.

Исходя из этого функцию эволюции системы запишем следующим образом:

$$f(x(t)) = \begin{pmatrix} v - \frac{(W_{\text{п}} + B_{\tau})}{M(1 + \gamma)} \\ a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где M – масса поезда,

$W_{\text{п}}$ – сопротивление движению поезда,

В данном случае измеряемой величиной является скорость. Поэтому вектор-функция измерений постоянна и представлена матрицей-строкой:

$$h(t) = H = (10 \ 000). \quad (9)$$

Первым этапом работы фильтра Калмана является прогноз состояния системы:

$$\hat{x}(t) = f(x(t - dt)), \quad (10)$$

где dt – шаг интегрирования. Затем вычисляется ковариационная матрица фильтра:

$$\hat{P}(t) = JPJ^T, \quad (11)$$

где J – якобиан вектор-функции $f(x(t))$. После этого полученный прогноз корректируется с учетом прошедшего от датчиков сигнала скорости $z(t)$. Для коррекции прогноза вычисляется матрица коэффициентов фильтра:

$$K(t) = \hat{P}(t)H^T (H\hat{P}(t)H^T + R)^{-1}. \quad (12)$$

Полученный прогноз корректируется:

$$x(t) = \hat{x}(t) + K(t) \left(z(t) - H\hat{x}(t) \right), \quad (13)$$

и обновляется ковариационная матрица:

$$P(t) = (I - KH^T) \hat{P}(t). \quad (14)$$

Настраиваемыми параметрами фильтра являются матрицы Q и R . За R в данной работе принята дисперсия шума датчика скорости $0,01 \text{ (км/ч)}^2$. Матрица Q подбирается исходя из отклонений реальных параметров от расчетных.

Для иллюстрации работы фильтра был смоделирован режим торможения поезда, состоящего из 70 полувагонов, с начальной скоростью движения 70 км/ч . На рис. 3 приведены результаты расчетов, иллюстрирующих работу устройства ПУ2, а именно определение коэффициентов формулы расчетного коэффициента трения (3) (рис. 3, а–г), величины давления в тормозном цилиндре первого вагона (рис. 3, д) и тормозной силы поезда (рис. 3, е). Фильтр включается в работу после достижения в ТЦ давления

0,05 МПа. В данном исследовании начальные значения коэффициенты уравнения были приняты следующими: $a = 0,46$, $b = 145$, $c = 1,5$, $d = 155$. При этом истинные значения коэффициентов приняты равными приведенным в правилах тяговых расчетов (ПТР) [10]: $a = 0,36$, $b = 150$, $c = 2$, $d = 150$ [10].

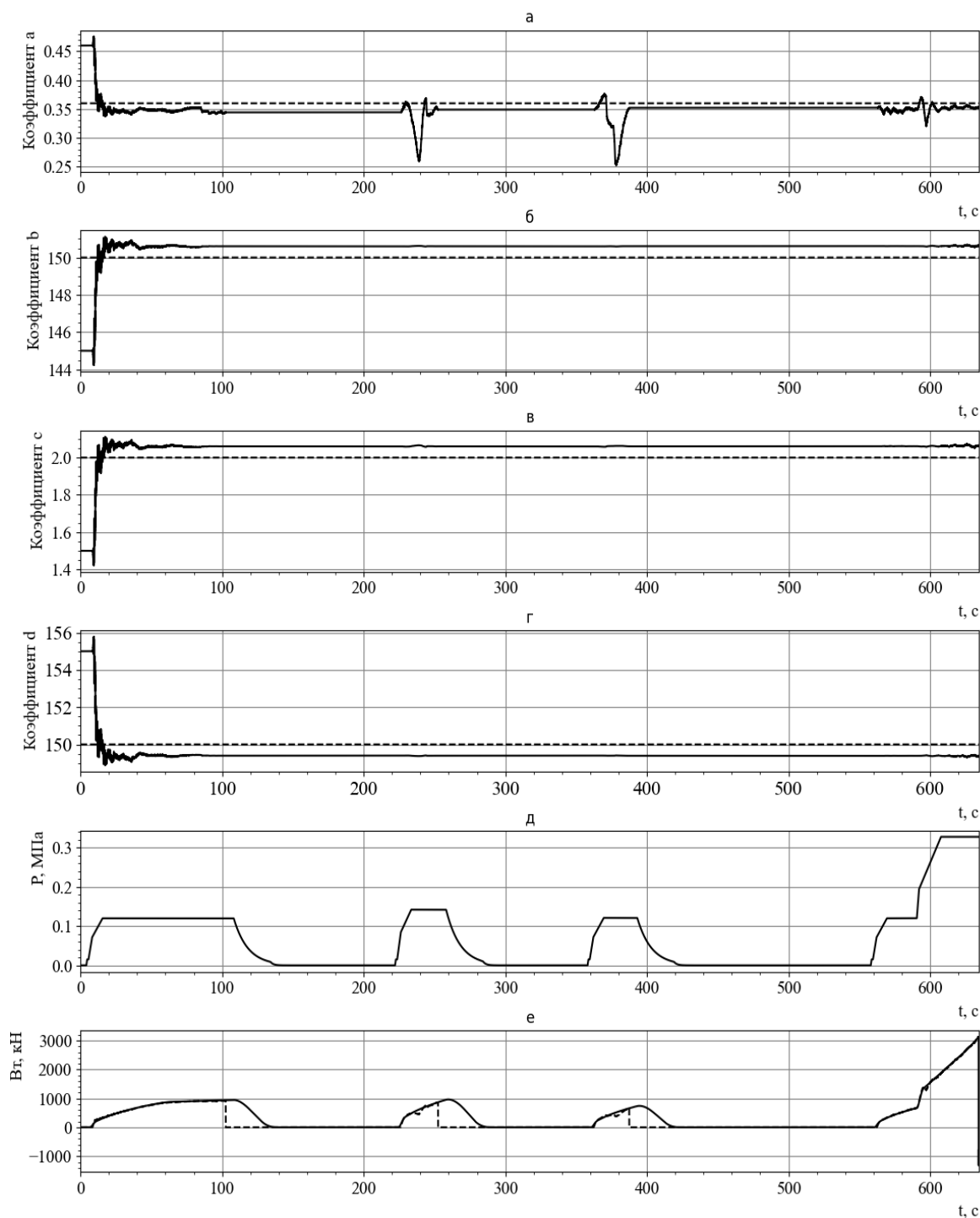


Рис. 3. Результаты работы фильтра Калмана в процессе торможения поезда

Как видно из приведенных на рис. 3 графиков, в результате работы фильтра оценочные значения коэффициентов (сплошные линии) приближаются к их реальным значениям (пунктирные линии). В оценке присутствуют незначительные отклонения (в пределах 5 %), обусловленные влиянием продольных колебаний в поезде и связанными с этим изменениями скорости движения поезда и рядом других факторов.

Было выполнено исследование работы системы автоматического управления с использованием разработанной ее имитационной модели. Для этого было рассмотрено движение поезда общей массой 6780 тонн и состоящего из 70 вагонов, оборудованных воздухораспределителями, работающими в

«груженом» режиме, авторежимами и композиционными тормозными колодками [6]. Моделировалась работа САУ в режиме прицельного торможения, обеспечивающего снижение скорости перед ограничением скорости с последующей стабилизацией, а также остановочное торможение в фиксированной точке пути. В начальный момент времени поезд движется по площадке со скоростью 70 км/ч, с последующим переходом на спуск со средней величиной уклона $-4,2\%$ и далее снова на площадку. Координата 7700 м соответствует заданной точке остановки.

Продольный профиль пути, совмещенный со значениями ограничения скорости, приведен на рис. 4 (кривая 1 и 2 соответственно).

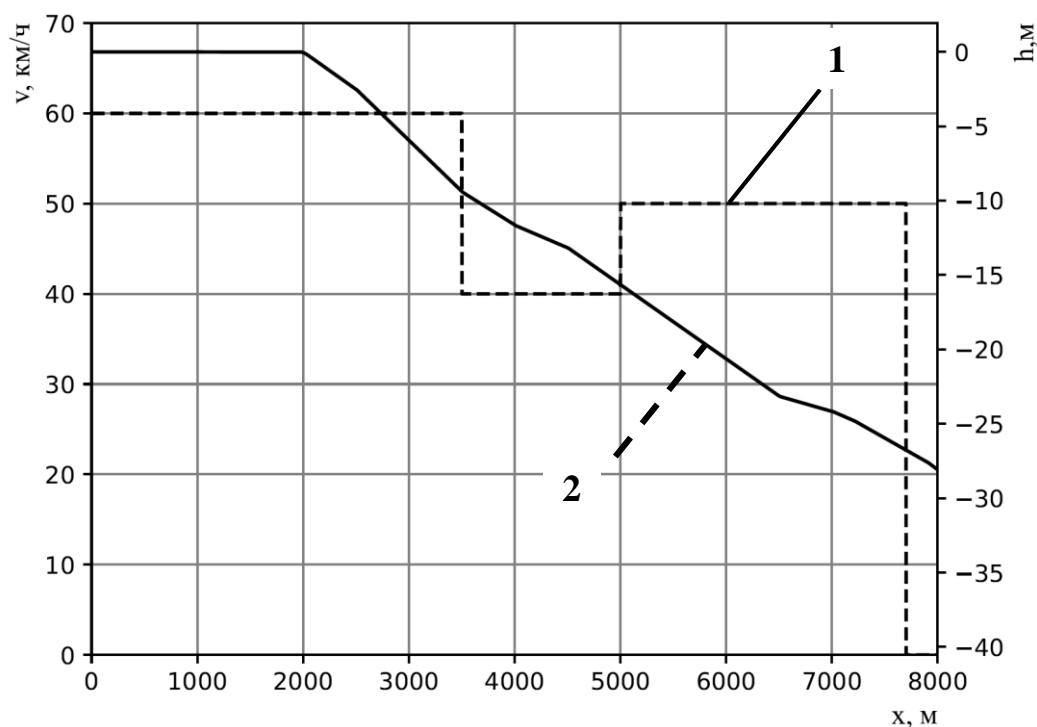


Рис. 4. Высота профиля и ограничение скорости

Оценим влияние применения алгоритма идентификации параметров поезда на качество управления. Для этого выполним две серии расчетов: без использования фильтра и с фильтром. Результаты расчета скорости движения v , давления в тормозном цилиндре РТЦ с алгоритмом ЕКФ приведены на рис. 5, на рис. 6 приведены аналогичные кривые, рассчитанные без использования алгоритма ЕКФ.

Рассмотрим подробнее результаты моделирования с использованием фильтра ЕКФ. В начальный момент времени поезд движется со скоростью 70 км/ч. После того как на вход системы управления тормозом поступает сигнал о снижении скорости до 60 км, начинается разрядка тормозной магистрали на величину равную 0,05 МПа (рис. 5, б). После этого давление в тормозных цилиндрах локомотива начинает расти и через 20 секунд достигает величины 0,12 МПа. Вследствие этого тормозная сила поезда возрастает, что сопровождается соответствующим снижением скорости. Одновременно в блоке промежуточного устройства ПУ1 выполняется выбор точки отпуска тормоза по критерию непревышения фактическим значением скорости величины ограничения при движении в процессе отпуска тормоза, выбега и начала последующего торможения. Выбор координаты данной точки осуществляется в блоке ПУ1 путем выполнения упреждающего тягового расчета с периодичностью 2,5 с. Как было отмечено, результатом данного расчета является кривая скорости поезда $v(x)$, рассчитанная для режима отпуска тормозов с последующим движением в течение 60 секунд. Для первого торможения (регулируемого) величины тормозных коэффициентов принимаются равными усредненным значениям, приведенным в ПТР [10]. Одновременно с этим в процессе торможения в блоке ПУ2 происходит процедура идентификации для определения истинных значений тормозных коэффициентов поезда.

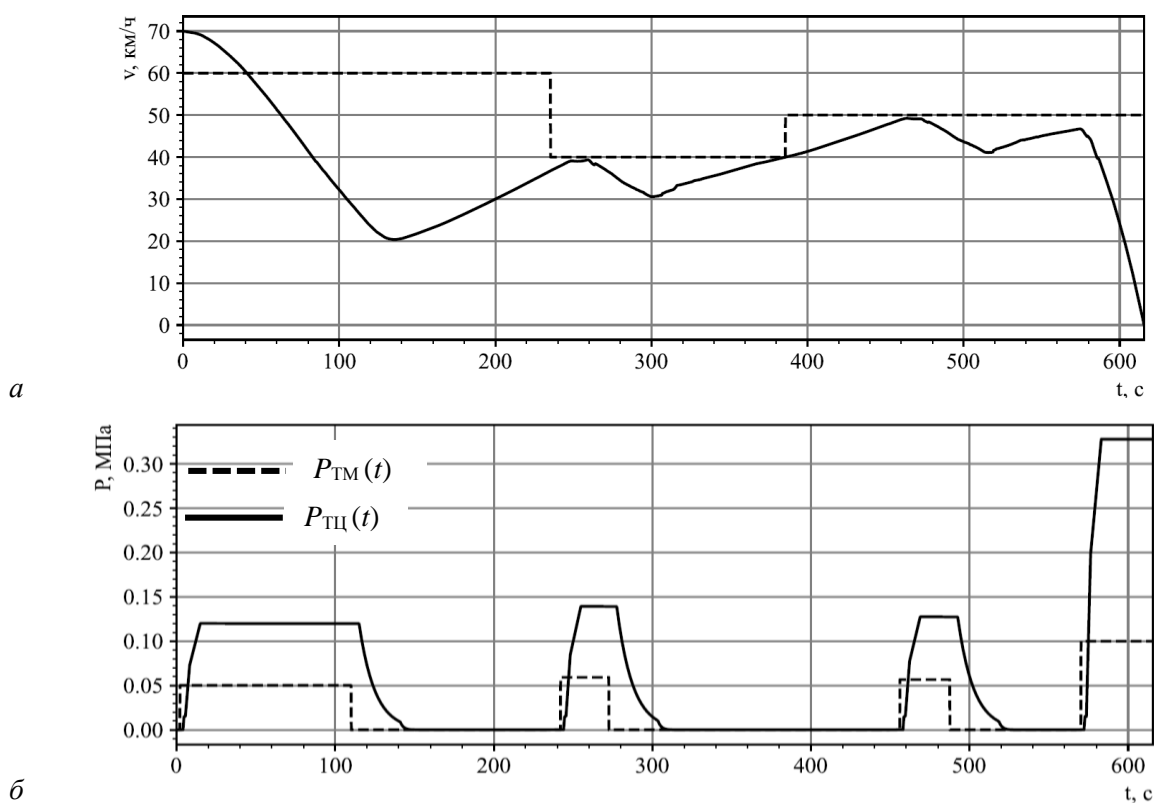


Рис. 5. Результаты расчета скорости движения v , давления в тормозном цилиндре $P_{ТЦ}$ с алгоритмом ЕКФ:

a – скорость движения первого экипажа $v(t)$; *б* – давление: $P_{ТЦ}(t)$ – в тормозном цилиндре первого экипажа; $P_{ТМ}(t)$ – в тормозной магистрали

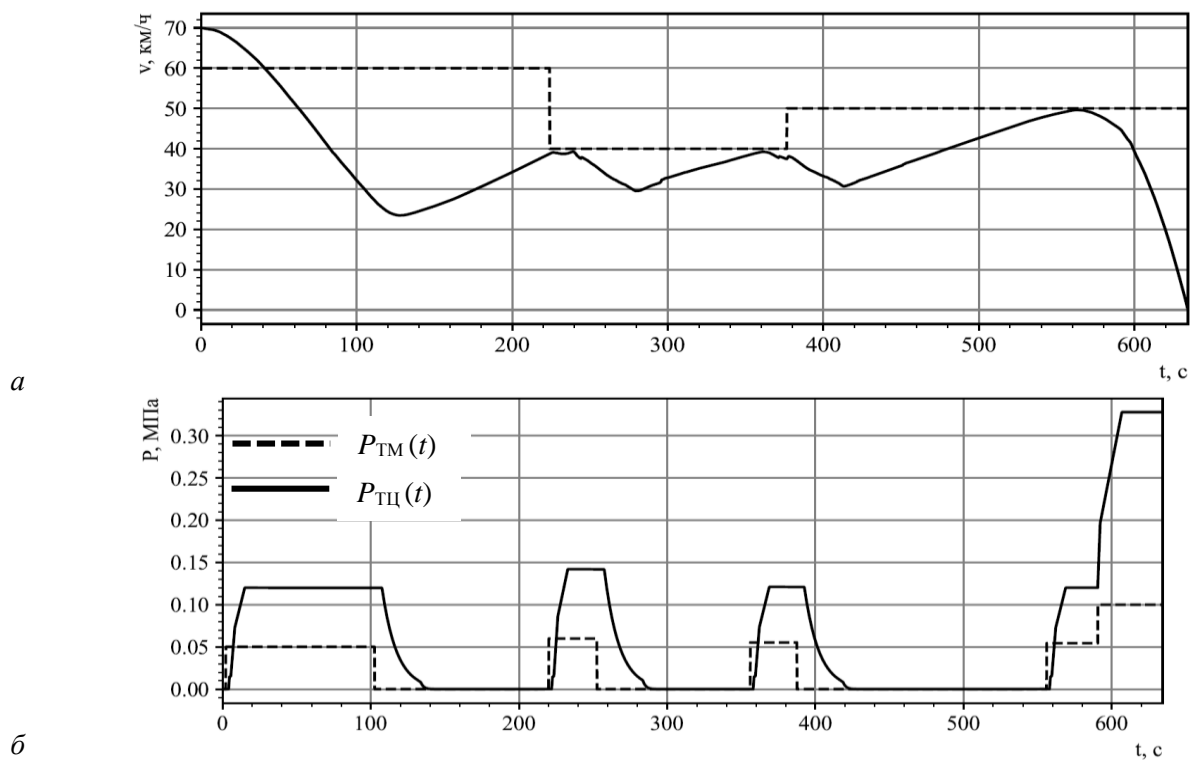


Рис. 6. Результаты расчета скорости движения v , давления в тормозном цилиндре $P_{ТЦ}$ без использования алгоритма ЕКФ:

a – скорость движения первого экипажа $v(t)$; *б* – давление: $P_{ТЦ}(t)$ – в тормозном цилиндре первого экипажа; $P_{ТМ}(t)$ – в тормозной магистрали

После начала торможения при движении по спуску пневматический тормоз находится в режиме перекрыши в течение 100 с, что значительно превышает минимально допустимое значение, равное 30 с [1]. В момент времени 110 с, который определен по результатам упреждающего расчета, формируется команда на отпуск тормозов, в результате чего давление в тормозной магистрали увеличивается до зарядного, после чего через 10 с давление в тормозных цилиндрах начинает снижаться, тормозная сила уменьшается, что сопровождается ростом скорости. Полный отпуск тормозов локомотива завершается через 25 с. Далее состав движется на выбеге в течение 100 с. В момент времени 230 с, когда локомотив находится в точке пути с координатой 3500 м, величина ограничения скорости уменьшается с 60 км/ч до 40 км/ч. Далее, в соответствии с результатами упреждающего расчета, вновь применяется ступень торможения с параметрами, аналогичными рассмотренными ранее, и процесс повторяется. При этом все расчеты по выбору точки начала торможения, движения в режиме торможения и отпуска выполняются с использованием найденных в результате решения задачи идентификации во время предыдущего торможения величин тормозных коэффициентов.

Далее программой исследования предусмотрено остановочное торможение в координате 7700 м. Для осуществления прицельного остановочного торможения осуществляется выбор точки начала торможения, в результате в момент времени 585 с САУ формирует команду на полное служебное торможение, и поезд останавливается в точке с координатой 7678 м за 22 м до целевой координаты. Отметим, что система САУТ-ЦМ/485 имеет точность остановки $[-100; +10]$ м.

Также было выполнено исследование движения поезда при отключенной процедуре идентификации. В целом процессы, происходящие в системе автоматического управления в данном случае, аналогичны рассмотренным ранее. Однако из-за несоответствия расчетных параметров поезда действительным, используемым при выработке управляющих воздействий, ухудшилось качество управления – сократились промежутки времени между последовательным применением тормозов, также для остановочного торможения была применена дополнительная ступень торможения, что привело к снижению технической скорости движения с 44,71 до 43,92 км/ч.

Кроме этого, произошел проезд расчетной точки остановки поезда на 69 м, что является грубым нарушением безопасности движения, так как в реальных условиях эксплуатации может выразиться в проезде на запрещающий сигнал светофора.

Также было выполнено исследование работы алгоритма блокировки отпуска регулировочного торможения при приближении к заданной точке остановки. На рис. 7 приведены результаты расчета, иллюстрирующие работу этого алгоритма.

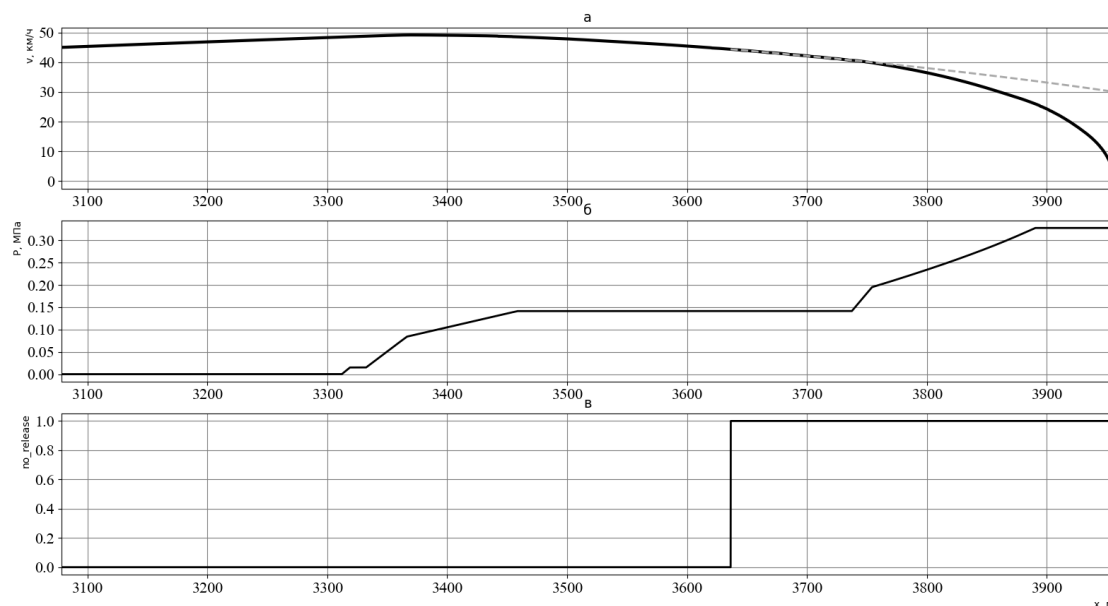


Рис. 7. Формирование сигнала запрета отпуска при регулировочном торможении

В начальный момент времени поезд движется на выбеге по спуску со скоростью 45 км/ч, величина ограничения скорости составляет 50 км/ч. При приближении величины фактической скорости к ограничению в момент времени $t = 18$ с выполняется торможение с разрядкой тормозной магистрали на величину $\Delta P_{\text{ТМ}}$ в соответствии с (1), в результате чего к моменту времени $t = 28$ с в тормозных цилиндрах ТЦ устанавливается давление 0,15 МПа. На участке пути с координатой 3630 м отпуск тормоза

блокируется по критерию минимального времени нахождения в режиме торможения, а по истечении этого времени – по критерию непревышения скорости во время движения на выбеге в течение минимального допустимого времени до следующего торможения. За 600 м до заданной точки прицельного остановочного торможения в соответствии с описанным ранее алгоритмом начинается выполнение расчета по выбору координаты точки начала торможения. В результате при нахождении поезда в точке с координатой 3750 м применяется ступень торможения $\Delta P_{\text{ТМ}}$ и значение величины разрядки ТМ достигает 0,1 МПа, при этом давление в ТЦ достигает величины 0,35 МПа. Остановка поезда происходит в точке с координатой 3955 м.

Вывод

Таким образом, предложенная система управления пневматическим тормозом с предлагаемой структурой, реализующей процедуру идентификации реальных параметров поезда, обеспечивает высокое качество управления поездом при регулировочном торможении и достаточную точность при остановочном, вместе с тем более энергоэффективно используя ресурсы поезда, при соблюдении всех требований, установленных нормативными документами.

Тем не менее целесообразно провести моделирование движения составов разной длины и массы и исследовать работу предложенной системы при отказах измерительных устройств (датчиков). Для повышения безопасности движения имеет смысл оценить риски при ложной идентификации параметров ЕКФ и предусмотреть алгоритмы компенсации неверной оценки параметров. Также стоит оценить экономические затраты на внедрение предложенного алгоритма в существующие САУТ и провести анализ совместимости с системами типа БЛОК-М.

Список литературы

- 1 Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : утверждены Приказом Минтранса России № 151 от 03.06.2014 . – Москва, 2015. – 162 с.
- 2 Автоматизированные системы управления электроподвижным составом: учебник для студентов, обучающихся по специальности 190300. 65 «Подвижной состав железных дорог» ВПО : в 3 ч. / под редакцией Л. А. Баранова, А. Н. Савоськина. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на ж.д. транспорте, 2013. – Ч. 1 : Теория автоматического управления / Л. А. Баранов [и др.]. – 398 с. – ISBN 978-5-89035-616-1.
- 3 Пудовиков, О. Е. Совершенствование системы автоматического управления пневматическим тормозом грузового длинносоставного поезда / О. Е. Пудовиков, С. А. Муров // Транспорт : наука, техника, управление. – 2014. – № 4 – С. 21–26. – ISSN 0236-1914.
- 4 Пудовиков, О. Е. Система управления пневматическим тормозом грузового поезда / О. Е. Пудовиков, Г. М. Менакер // Электротехника. – 2023. – № 9. – С. 34–39. – ISSN 0013-5860.
- 5 Пудовиков, О. Е. Автоматическое управление пневматическим тормозом грузового поезда / О. Е. Пудовиков, Г. М. Менакер // Интеллектуальные транспортные системы : материалы II Международной научно-практической конференции. – Москва, 2023. –

References

- 1 Rules for the technical maintenance of brake equipment and brake control of railway rolling stock : approved by the Order of the Ministry of Transport of Russia No. 151 dated 03.06.2014. – Moscow, 2015. – 162 p.
- 2 Automated control systems for electric rolling stock : a textbook for students studying in the specialty 190300. 65 “Rolling stock of railways” of higher professional education : in 3 parts / edited by L. A. Baranov, A. N. Savoskin. – Moscow : Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport, 2013. – Part 1 : Theory of automatic control / L. A. Baranov [et al.]. – 398 p. – ISBN 978-5-89035-616-1.
- 3 Pudovikov, O. E. Improvement of the automatic control system of the pneumatic brake of a long freight train / O. E. Pudovikov, S. A. Murov // Transport : science, technology, management. – 2014. – No. 4. – P. 21–26. – ISSN 0236-1914.
- 4 Pudovikov, O. E. Control system of a pneumatic brake of a freight train / O. E. Pudovikov, G. M. Menaker // Electrical Engineering. – 2023. – No. 9. – P. 34–39. – ISSN 0013-5860.
- 5 Pudovikov, O. E. Automatic control of the pneumatic brake of a freight train / O. E. Pudovikov, G. M. Menaker // Intelligent Transport Systems : materials of the II International scientific and practical conference. – Moscow, 2023. – DOI 10.30932/9785002182794-2023-322-329.

DOI 10.30932/9785002182794-2023-322-329.

6 **Асадченко, В. Р.** Автоматические тормоза подвижного состава : учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / В. Р. Асадченко. – Москва : Маршрут, 2006. – 392 с. – ISBN 5-89035-275-X.

7 Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Е. Л. Стамблер [и др.] ; под редакцией Е. П. Блохина. – Москва : Транспорт, 1986. – 263 с.

8 **Браммер, К.** Фильтр Калмана – Бьюси / К. Браммер, Г. Зиффлинг. – Москва, 1982. – 200 с.

9 **ГОСТ 34434–2018.** Тормозные системы грузовых железнодорожных вагонов. Технические требования и правила расчета : межгосударственный стандарт : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 ноября 2018 г. № 1036-ст. – Москва : Стандартиформ, 2018. – 28 с.

10 Правила тяговых расчетов для поездной работы : утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р в редакции Распоряжения ОАО «РЖД» от 09.02.2018 № 182/р. – Москва : ОАО «Российские железные дороги», 2018. – 516 с.

11 **Головин, В. И.** Автоматизация управления торможением поездов / В. И. Головин, Б. Д. Никифоров, Ю. Г. Кутыев. – Москва : Транспорт, 1985. – 263 с.

12 **Комков, Е. В.** Учет загрузки поезда метрополитена при автоматическом прицельном торможении / Е. В. Комков // Вестник ВНИИЖТ. – 1984 – № 3. – С. 15–17.

13 **Капустин, М. Ю.** Модель адаптивной системы прицельного электропневматического торможения электропоезда / М. Ю. Капустин, С. И. Краснолобов, П. С. Саркисян // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 4. – С. 33–43. – ISSN 2074-9325.

14 **Патент № 2715915 Российская Федерация, МПК ВО60Т 8/172 (2006.01), В61Л 3/12 (2006.01).** Способ и система управления пневматическими тормозами железнодорожного подвижного состава / Л. М. Жебрак, М. В. Сафро. – № 2017143208 ; заявл. 11.12.2017 ; опубл. 04.03.2020, Бюл. № 7.

15 **Савоськин, А. Н.** Параметрическая оптимизация автоматического регулятора пневматического торможения грузового поезда / А. Н. Савоськин, П. Е. Коваль, В. В. Лосев // Фундаментальные проблемы динамики и прочности подвижного состава : юбилейный сборник научных трудов. Москва : МИИТ, 1997. – № 912. – С. 93–96.

6 **Asadchenko, V. R.** Automatic brakes of rolling stock : a textbook for higher education institutions of railway transport / V. R. Asadchenko. – Moscow : Marshrut, 2006. – 392 p. – ISBN 5-89035-275-X.

7 Calculations and testing of heavy trains / E. P. Blokhin, L. A. Manashkin, E. L. Stambler [et al.] ; edited by E. P. Blokhin. – Moscow : Transport, 1986. – 263 p.

8 **Brammer, K.** Kalman – Busey filter / K. Brammer, G. Siffling. – Moscow, 1982. – 200 p.

9 **GOST 34434–2018.** Brake systems of freight railway cars. Technical requirements and calculation rules : interstate standard : put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 27, 2018 No. 1036-art. – Moscow : Standartinform, 2018. – 28 p.

10 Rules for traction calculations for train operation. Approved by the Order of JSC Russian Railways dated 12.05.2016 No. 867r as amended by the Order of JSC Russian Railways dated 09.02.2018 No. 182/r. – Moscow : JSC Russian Railways, 2018. – 516 p.

11 **Golovin, V. I.** Automation of train braking control / V. I. Golovin, B. D. Nikiforov, Yu. G. Kutyev. – Moscow : Transport, 1985. – 263 p.

12 **Komkov, E. V.** Accounting for the loading of a metro train with automatic targeted braking / E. V. Komkov // The Russian Railway Science Journal. – 1984. – No. 3– P. 15–17.

13 **Kapustin, M. Yu.** A model of the adaptive system of targeted electropneumatic braking of an electric train / M. Yu. Kapustin, S. I. Krasnolobov, P. S. Sargsyan // Science and Technology of Transport. – 2011. – No. 4. – P. 33–43. – ISSN 2074-9325.

14 **Patent No. 2715915 Russian Federation, IPC BO60T 8/172 (2006.01), B61L 3/12 (2006.01).** Method and system for controlling pneumatic brakes of railway rolling stock / L. M. Zhebrak, M. V. Safro. – No. 2017143208 ; declared 11.12.2017 ; published 04.03.2020, Bull. No. 7.

15 **Savoskin, A. N.** Parametric optimization of automatic regulator of pneumatic braking of a freight train / A. N. Savoskin, P. E. Koval, V. V. Losev // Fundamental problems of dynamics and strength of rolling stock : jubilee collection of scientific papers. – Moscow : MIIT, 1997. – No. 912. – P. 93–96.

*G. M. Menaker, O. E. Pudovikov***ADAPTIVE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE PNEUMATIC BRAKE OF A FREIGHT TRAIN**

Abstract. A functional scheme of the automatic control system for the pneumatic brake of a freight train with the possibility of identifying the actual braking parameters of the train and the resistance to movement is proposed, which along with other means of automatic train control ensures the safety of transportation on railway transport. The extended Kalman–EKF filter was used as an algorithm for identifying the braking parameters of the train, as well as the resistance to movement. The results of modeling with the use of algorithm EKF and without it are presented. The advantage of using the proposed system in terms of ensuring high-quality control by increasing the intervals between braking on a “harmful” descent is shown, which contributes to increase of section speed of movement, as well as sufficiently accurate implementation of the algorithm of target braking.

Keywords: automatic control, pneumatic brake, longitudinal mathematical modeling, parameter identification.

For citation: Menaker, G. M. Adaptive automatic control system for the pneumatic brake of a freight train / G. M. Menaker, O. E. Pudovikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 132–144. DOI 10.46973/0201–727X_2025_2_132.

Сведения об авторах**Менакер Григорий Максимович**

Российский университет транспорта
(РУТ (МИИТ)),
кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
аспирант,
e-mail: g.menaker@mail.ru

Пудовиков Олег Евгеньевич

Российский университет транспорта
(РУТ (МИИТ)),
кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: olegp@mail.ru

Information about the authors**Menaker Grigory Maksimovich**

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),
Chair “Electric Trains and Locomotives”,
Postgraduate Student,
e-mail: g.menaker@mail.ru

Pudovikov Oleg Evgenievich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),
Chair “Electric Trains and Locomotives”,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Head of the Chair,
e-mail: olegp@mail.ru