

## Исследование газодинамических процессов в электропневматических тормозах на электропоезде ЭД9М

А.А. Корсун✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉korsunanton1998@gmail.com

### Резюме

В процессе разработки алгоритма адаптивного управления тормозным нажатием колодок пассажирского подвижного состава при электропневматическом торможении возникла необходимость учесть протекающие в тормозной системе газодинамические процессы. Для этого в моторвагонном депо «Иркутск» был проведен эксперимент на электропоезде ЭД9М во время стоянки с применением специального цифрового оборудования. В ходе эксперимента выполнено некоторое количество циклов торможения с целью выявления задержки между подачей управляющего воздействия краном машиниста и началом наполнения тормозного цилиндра или его разрядкой, также выявлено количество возможных ступеней разрядки тормозного цилиндра при ручном управлении электропневматическими тормозами для уточнения алгоритма адаптивного торможения. Датчики давления подключались в семи точках тормозной системы: тормозной цилиндр, ложный тормозной цилиндр, рабочая камера воздухораспределителя, питательный и запасный резервуары, питательная магистраль, тормозная магистраль. Сигнал с датчиков давления поступал в устройство регистрации и сохранения данных. Момент начала подачи управляющего воздействия в электропневматическую тормозную систему путем перевода ручки крана машиниста в положения «отпуск», «перекрышка» и «торможение», фиксировался датчиками света, установленными на лампах перекрышка и торможение на панели управления в кабине машиниста. В результате эксперимента подтверждена возможность применения алгоритма адаптивного торможения при управлении электропневматическими тормозами в части их быстродействия и управляемости.

### Ключевые слова

моторвагонный подвижной состав, тормозная система, газодинамические процессы, датчик давления, регистратор аналоговых сигналов, алгоритм адаптивного управления тормозным нажатием

### Для цитирования

Корсун А.А. Исследование газодинамических процессов в электропневматических тормозах на электропоезде ЭД9М / А.А. Корсун // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 123–133. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).123-133.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 21.11.2023 г.; поступила после рецензирования: 24.11.2023 г.; принята к публикации: 27.11.2023 г.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания по государственной работе «Адаптивная система автоматического управления с повышенной эффективностью тормозами пассажирских и высокоскоростных поездов» № 121050600026-9 от 06.05.2021.

## Research of gas dynamic processes in electro pneumatic brakes on an electric train ED9M

А.А. Korsun✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉korsunanton1998@gmail.com

### Abstract

In the process of developing an algorithm for adaptive control of pushing the braking pads of passenger rolling stock during electro-pneumatic braking, it became necessary to take into account the gas-dynamic processes occurring in the braking system. For this, an experiment was conducted at the Irkutsk motor wagon depot on the ED9M electric train during its parking using special digital equipment. In the course of the experiment, a certain number of braking cycles were performed in order to identify delays between the supply of the control action by the driver's crane and the beginning of filling the brake cylinder or its discharge, the number of possible stages of discharge of the brake cylinder with manual control of electro-pneumatic brakes was also revealed to clarify the adaptive braking algorithm. Pressure sensors were connected at seven points of the brake system: in the brake cylinder, false brake cylinder, working chamber of the air distributor, feed and spare tanks, feed line and brake line. The signal from the pressure sensors was sent to the data recording and storage device. The moment the control action was applied to the electro-pneumatic braking system by transferring the

driver's crane handle to the release, overlap and braking positions was recorded by light sensors installed on the overlap and braking lamps on the control panel in the driver's cabin. As a result of the experiment, the possibility of using an adaptive braking algorithm for controlling electropneumatic brakes was confirmed in terms of their speed and controllability.

### Keywords

motor wagon rolling stock, braking system, gas dynamic processes, pressure sensor, analog signal recorder, adaptive brake control algorithm

### For citation

Korsun A.A. Issledovanie gazodinamicheskikh protsessov v elektropnevmaticheskikh tormozakh na elektropoezde ED9M [Research of gas dynamic processes in electro pneumatic brakes on an electric train ED9M]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 123–133. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).123-133.

### Article Info

Received: November 21, 2023; Revised: November 24, 2023; Accepted: November 27, 2023.

### Acknowledgement

The work was carried out within the framework of the state task for the state work «Adaptive automatic control system with increased efficiency of passenger and high-speed train brakes» No. 121050600026-9 dated 6 May, 2021.

### Введение

В настоящее время компания ОАО «РЖД» сталкивается с проблемой падения участковой скорости, вследствие чего значительно снижается ее прибыль. Одним из параметров, влияющих на участковую скорость движения поездов, является эффективность тормозов [1]. В предыдущих работах были предложены алгоритм адаптивного управления тормозным нажатием и устройство для его реализации, позволяющие сократить тормозной путь пассажирских поездов и электропоездов при управлении электропневматическими тормозами (ЭПТ), а также значительно снизить вероятность заклинивания колесных пар и образования ползунов. Принцип адаптивного управления тормозами на основе программной адаптации рассмотрен в [2] и построен на основании формул, представленных в [3] и иной научной литературе. За рубежом ученые исследуют в основном системы текущей адаптации, работающие в условиях неопределенности и предусматривающие наличие обратной связи по параметру частоты вращения колесной пары [4].

Для того чтобы обеспечить торможение поезда с постоянным коэффициентом запаса по нажатию в полуавтоматическом и автоматическом режимах работы, разработанное устройство должно выполнять управление сжатым воздухом в тормозных цилиндрах (ТЦ) с высокой точностью [5]. С точки зрения теории автоматического управления для решения поставленной задачи необходимо определить передаточную функцию звеньев системы ЭПТ.

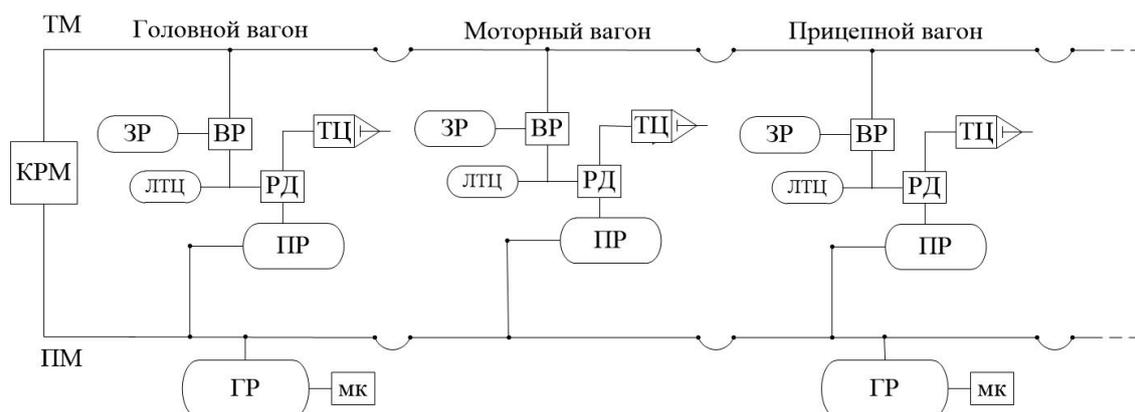
Нужно установить влияние инерции пневматических процессов, создающих задержки отклика тормозов на управляющие воздействия. Целью данной статьи является демонстрация проведенного эксперимента на электропоезде ЭД9М по исследованию газодинамических процессов, протекающих в тормозной системе при управлении ЭПТ. Далее в данной статье будут рассмотрены метод проведения эксперимента и частично приведены полученные результаты.

### Описание особенностей конструкции тормозной системы электропоезда ЭД9М

Современный моторвагонный подвижной состав оборудован пневматической тормозной системой с повторителями, питающимися от питательной магистрали (ПМ) (рис. 1) [6–9].

Использование такой системы повышает тормозную эффективность электропоезда, благодаря ее быстрдействию и неистощимости питательных и главных резервуаров на каждом вагоне электропоезда. Данная система схожа с двухтрубной тормозной системой, которая подразумевает использование питательной магистрали вдоль всей длины поезда параллельно тормозной для питания запасных резервуаров. Анализ эффективности использования двухтрубной тормозной системы более подробно описан в [10].

Отличительной особенностью тормозной системы электропоездов от тормозной системы пассажирских поездов с локомотивной тягой является питание ТЦ через повторители из ПМ, которая обеспечивает более интенсивную



**Рис. 1.** Упрощенная схема питания тормозов электропоезда ЭД9М сжатым воздухом  
**Fig. 1.** Simplified scheme for feeding the brakes of the ED9M electric train with compressed air

подачу сжатого воздуха при торможении из главных резервуаров, установленных на прицепных и моторных вагонах электропоезда. Наличие повторителей и реле давления (РД) в электропоездах позволяет ускорить работу тормозов и снизить их истощимость при циклических торможениях. Также в тормозной системе электропоезда присутствует ложный тормозной цилиндр (ЛТЦ) объемом семь литров (дополнительный резервуар), соединенный с воздухораспределителем, он необходим для обеспечения работы воздухораспределителя и пневматического реле. Наличие ЛТЦ влияет на инерционность процессов при торможении, что также является предметом исследования в рамках данной статьи. Воздухораспределитель (ВР) имеет значительное время перехода между положениями, а суммарный объем камеры и трубопроводов очень мал, поэтому, с учетом принципа действия ВР № 292 и № 242, без ЛТЦ происходило бы полное служебное торможение или полный отпуск тормозов. Это связано с зависимостью давления ТЦ от его объема в непосредственно тормозах. ЛТЦ дает возможность использовать ступенчатое регулирование сжатого воздуха в камере и через РД в ТЦ. Постоянный объем ЛТЦ позволяет более точно регулировать давление в ТЦ и обеспечивать минимизацию утечек критических при истощимых тормозах, применяемых на электропоездах. Важно отметить, что величина давления сжатого воздуха в питательной и тормозной магистралях, а также максимальное давление в ТЦ электропоезда отличается от величины давления данных объемов в пассажирских поездах с локомотивной тягой. Так, макси-

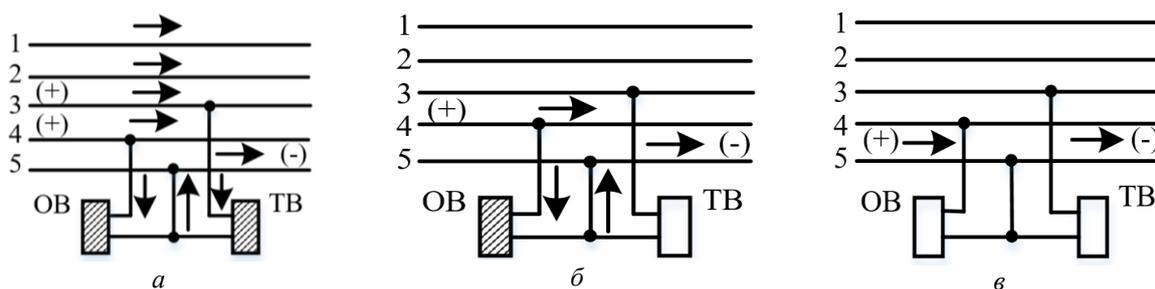
мальное давление в ТЦ на электропоезде ЭД9М составляет 0,34 МПа, а в поездах с локомотивной тягой оно равняется 0,4 МПа, в ТМ электропоезда давление составляет 0,45 МПа, а в пассажирских поездах с локомотивной тягой 0,48–0,5 МПа.

Принцип работы пневматической тормозной системы можно описать следующим образом. Мотор-компрессор (МК) заполняет главный резервуар (ГР) сжатым воздухом. По ПМ сжатый воздух попадает в главный орган управления тормозной системы – кран машиниста (КРМ). КРМ осуществляет управление тормозами за счет изменения давления в тормозной магистрали (ТМ). После этого вступает в работу ВР, который соединяет ТМ с запасным резервуаром (ЗР), и ЛТЦ, они контролируют давление сжатого воздуха между ЗР и ТЦ. Снижение давления в ТМ приводит к срабатыванию тормозов, а повышение к их отпуску [2].

ЭПТ на электропоезде также имеет отличия от ЭПТ на пассажирских поездах с локомотивной тягой. На электропоездах используется пятипроводная система, а на пассажирских поездах с локомотивной тягой – двухпроводная система ЭПТ.

Принцип действия ЭПТ можно описать с использованием схемы (рис. 2).

При реализации торможения напряжение (+50 В) подается в отпусковой 4 и тормозной 3 провода, а напряжение (–50 В) подается в обратный провод 5, что приводит к одновременному срабатыванию катушек отпускового и тормозного вентилей (ОВ и ТВ) электровоздухораспределителя № 305. При переводе ручки крана машиниста в положение 4 (перекрыша) снимается



**Рис. 2.** Структурная схема пятипроводного электропневматического тормоза на электропоезде: *a* – действие схемы при торможении; *б* – действие схемы при перекрыши; *в* – действие схемы при отпуске  
**Fig. 2.** The block diagram of a five-wire electro pneumatic brake on an electric train: *a* – the action of the circuit when braking; *b* – the action of the circuit when overlapping; *c* – the action of the circuit when releasing

напряжение с обоих вентилях. Контроль целостности по обратному проводу 5 обеспечивается при всех процессах работы схемы (торможение, перекрыша и отпуск), контроль целостности остальных проводов происходит только при торможении. Провод 1 является контрольным. При торможении наличие давления в ТЦ контролируется с помощью сигнального провода 2. Таким образом, при реализации режима «торможение» используются все пять линейных проводов, при режиме «перекрыша» ток протекает по отпусковому 4 и обратному 5 проводу, а при отпуске только по обратному 5 проводу [7].

На основе проведенного анализа особенностей тормозной системы электропоезда можно сделать вывод, что для определения инерционности тормозной системы в ходе эксперимента необходимо отслеживать изменение давления в следующих устройствах и объемах: рабочая камера воздухораспределителя № 305, ложный тормозной цилиндр, тормозной цилиндр, питательный и запасный резервуары, тормозная и питательная магистрали. Существует три вида вагонов в моторвагонном подвижном составе – прицепной головной, промежуточный прицепной и моторный. Так как электропоезд, на котором проводился эксперимент, состоял из четырех вагонов – два прицепных головных и два промежуточных моторных, датчики были установлены в каждый тип вагона, в первый – прицепной головной, в третий – промежуточный моторный. Для фиксации момента подачи управляющего воздействия в электрическую цепь ЭПТ необходимо контролировать реле или световые индикаторы, расположенные на панели управления в кабине машиниста, с обязательной синхронизацией с остальными газодинамиче-

скими процессами, протекающими в тормозной системе.

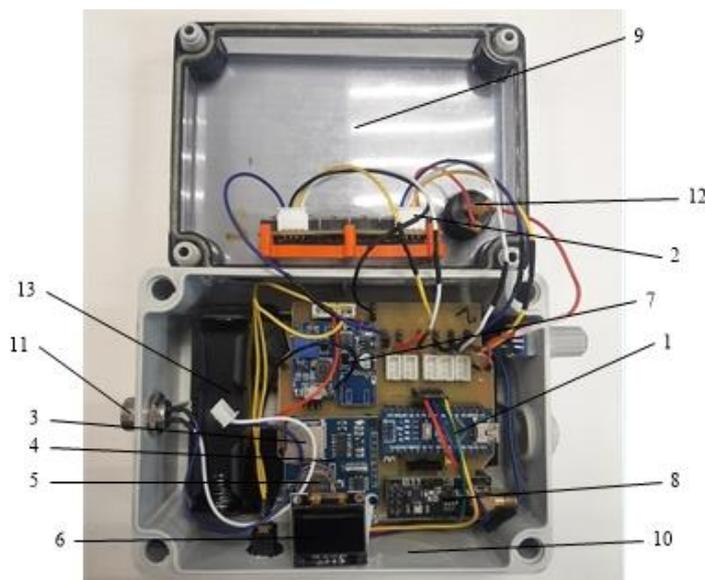
### Описание хода эксперимента

Эксперимент проводился в парке моторвагонного депо на электропоезде ЭД9М.

Как уже говорилось, целью эксперимента являлось исследование газодинамических процессов тормозной системы, а именно: определение времени отпуска тормозов, времени заполнения воздухом тормозных цилиндров, измерение задержек в срабатывании тормозной системы при переходе из одного режима работы в другой (зарядка / отпуск, перекрыша, торможение).

Для проведения эксперимента использовались 13 датчиков давления сжатого воздуха с максимальным измеряемым давлением 2,4 МПа, подключенные к регистраторам аналоговых сигналов с установленным в них съемным накопителем данных. Используемые датчики давления работают на основе пьезоэлементов [11]. В качестве вычислителя устройства использовался микроконтроллер с встроенными АЦП, время между опросами датчиков давления составляло 0,1 с. Блок регистрации является автономным и в течение эксперимента питался от аккумулятора. Всего было использовано три регистратора.

Сигнал с датчиков давления поступает на вход аналоговых сигналов регистратора 2. Затем микроконтроллер 1, который с помощью встроенного АЦП и разработанного программного кода (рис. 4), преобразует его в цифровой сигнал и через модуль регистрации 4 записывает на SD-карту 3 в виде CSV-файла для возможности дальнейшей работы в программе Microsoft Excel. На модуле регистрации также установлен мо-



**Рис. 3.** Регистратор аналоговых сигналов:

- 1 – микроконтроллер Arduino; 2 – вход аналоговых сигналов; 3 – съемный носитель информации в виде SD-карты; 4 – модуль регистрации данных; 5 – модуль часов реального времени; 6 – дисплей; 7 – DC-DC-преобразователь; 8 – радиомодуль; 9 – крышка; 10 – корпус; 11 – универсальный вход; 12 – кнопка включения; 13 – гнездо для литий-ионного аккумулятора

**Fig. 3.** Analog Signal Recorder:

- 1 – arduino microcontroller; 2 – analog signal input; 3 – removable storage medium in the form of an SD-card; 4 – data logging module; 5 – real-time clock module; 6 – display; 7 – DC-DC-converter; 8 – radio module; 9 – cover; 10 – box; 11 – universal input; 12 – power button; 13 – socket for lithium-ion battery

даль часов реального времени 5 для синхронизации записи графиков на всех устройствах, для удобства контроля процесса работы устройств текущие показания давления с датчиков выводятся на дисплей 6 сетки. На каждый вагон приходился один регистратор сигналов, при этом на головном вагоне к регистратору были подключены фотодатчики, закрепленные на лампах торможения и перекрыши, чтобы фиксировать процесс подачи управляющих воздействий от крана машиниста в электрическую часть ЭПТ.

После подключения оборудования к тормозной системе электропоезда с помощью крана машиниста № 395 были приведены в действия тормоза поезда. Для осуществления полного служебного электропневматического торможения кран переводили в положение VЭ до момента достижения максимальной величины давления ТЦ, равной 0,34 МПа. Затем ручка КРМ переводилась в положение перекрыши – IV, чтобы зафиксировать установленное давление сжатого воздуха в ТЦ. Далее ручка КРМ переводилась в поездное положение II до достижения полного отпуска ТЦ. Также в ходе эксперимента исследовались ступенчатые тор-

можения и ступенчатый отпуск. Для повышения давления осуществлялись кратковременные переводы ручки КРМ в положение VЭ с возвратом в IV положение – перекрыши. Использовались ступени величиной от 0,02 до 0,16 МПа, уменьшающиеся по мере роста давления в ТЦ. Всего осуществлялось пять-шесть ступеней при торможении в то время, как при отпуске их количество достигало десяти, где каждая имела величину от 0,09 до 0,01 МПа, в данном случае прослеживалась прямая зависимость – чем выше величина исходного давления в ТЦ перед его разрядкой, тем выше скорость процесса снижения давления. Разрядка осуществлялась кратковременным переводом крана во II положение, а фиксация величины давления в ТЦ положением IV.

Во время эксперимента показания давления сжатого воздуха в основных объемах системы записывались на съемный носитель данных, установленный в регистраторе аналоговых сигналов, с привязкой к реальному времени для возможности сравнительного анализа скорости процессов внутри системы при разных положениях и величинах давления.

```

Файл Правка Скетч Инструменты Помощь
proverka_Analog_time.ino OLED com eeprom izm sd time
long sum[6]; //

void izm_work() {
  int izm[6];
  izm[0] = analogRead(A0);
  izm[1] = analogRead(A1);
  izm[2] = analogRead(A2);
  izm[3] = analogRead(A3);
  izm[4] = analogRead(A6);
  izm[5] = analogRead(A7);

  for (int i = 0; i < 6; i++) {
    sum[i] += izm[i] * 10;
  }
  chet++;
  // delay(5);
}

void izm_usred(){
  for (int i = 0; i < 6; i++) {
    data[i] = my_round(sum[i] / chet);
    sum[i] = 0;
  }
  chet = 0;
}

int my_round(long x) {
  int result;
  if (x % 10 >= 5) result = x / 10 + 1;
  else result = x / 10;
  return result;
}

```

**Рис. 4.** Программный код, преобразующий аналоговые сигналы в цифровые, написанный в программной среде микроконтроллера Arduino

**Fig. 4.** Program code that converts analog signals to digital, written in the software environment of the Arduino microcontroller

### Результаты эксперимента

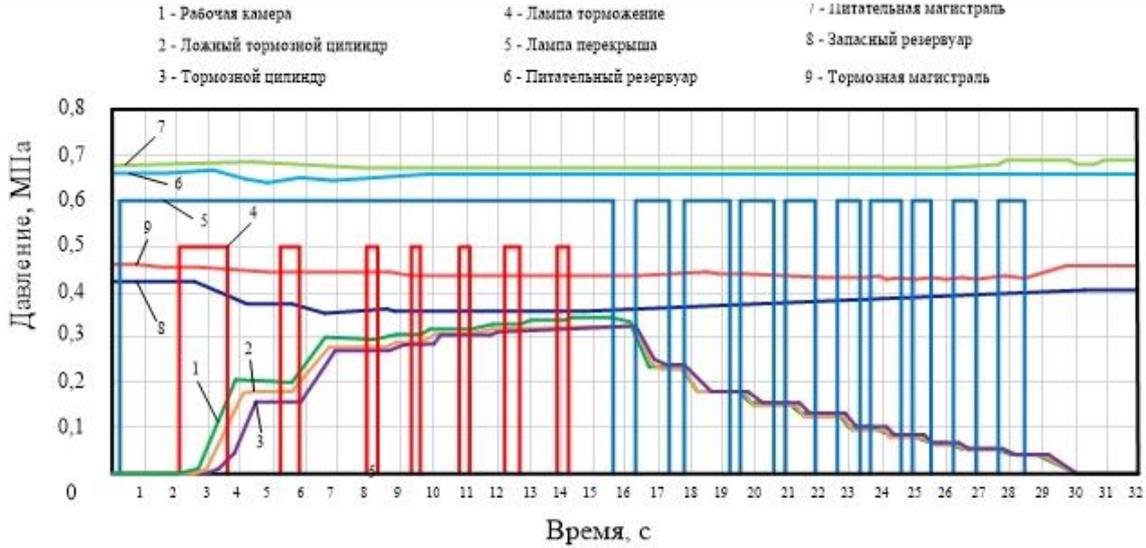
Полученные экспериментальные данные, записанные на SD-карту, были загружены в программную среду Microsoft Excel для дальнейшей обработки. В результате были получены графики торможения разными способами. Один из циклов торможения и отпуска приведен на рис. 5, на котором графики срабатывания сигнальных ламп и графики изменения давления в ключевых объемах тормозной системы совмещены на одной координатной плоскости. На рис. 5 наглядно видно, что торможение и отпуск осуществились ступенчато. Именно инерционность работы ЭПТ при ступенчатых торможениях и отпусках важно учитывать при разработке алгоритма адаптивного управления нажатием. Данные графики построены на основе показаний датчиков давления, установленных на прицепном головном вагоне.

На рис. 6, 7 приведены графики с обозначением задержек между подачей управляющего воздействия крана машиниста в V положении и

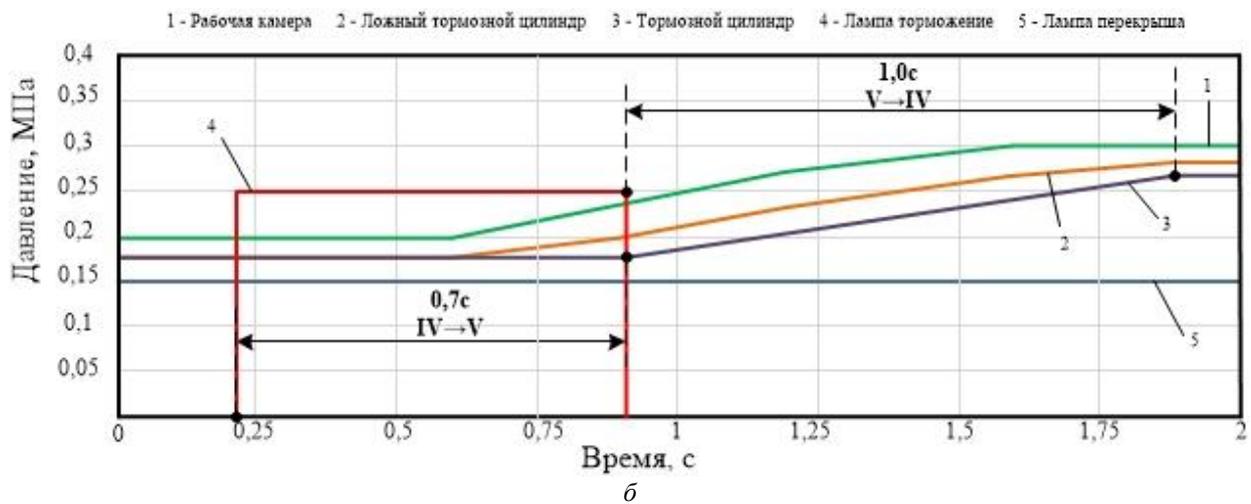
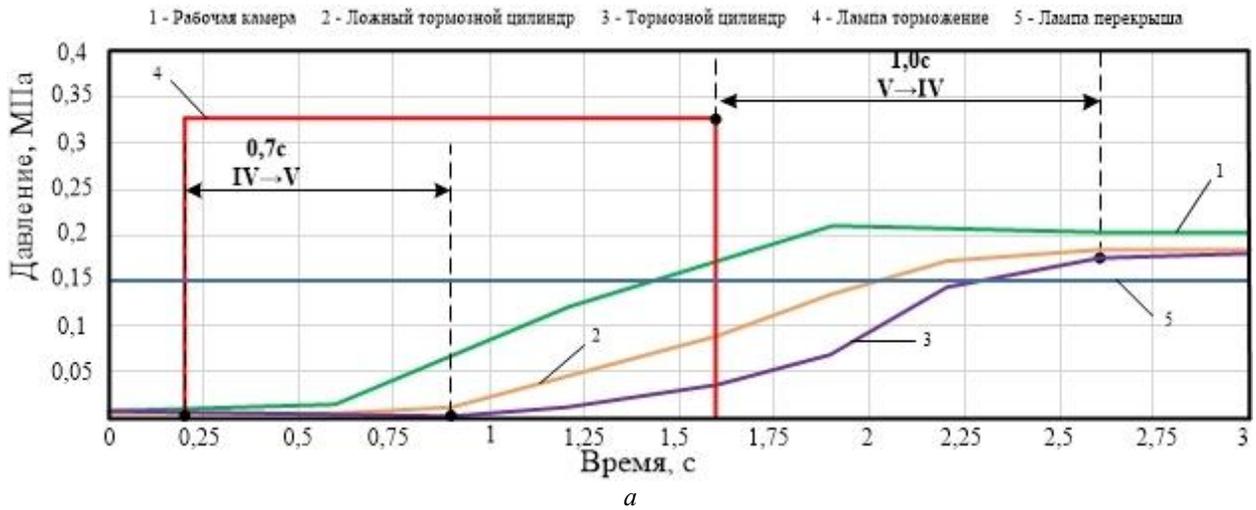
началом наполнения тормозного цилиндра, а также прекращением подачи управляющего воздействия в V положения и переводом ручки крана машиниста в IV положение перекрыши и моментом достижения установившегося давления сжатого воздуха в тормозном цилиндре.

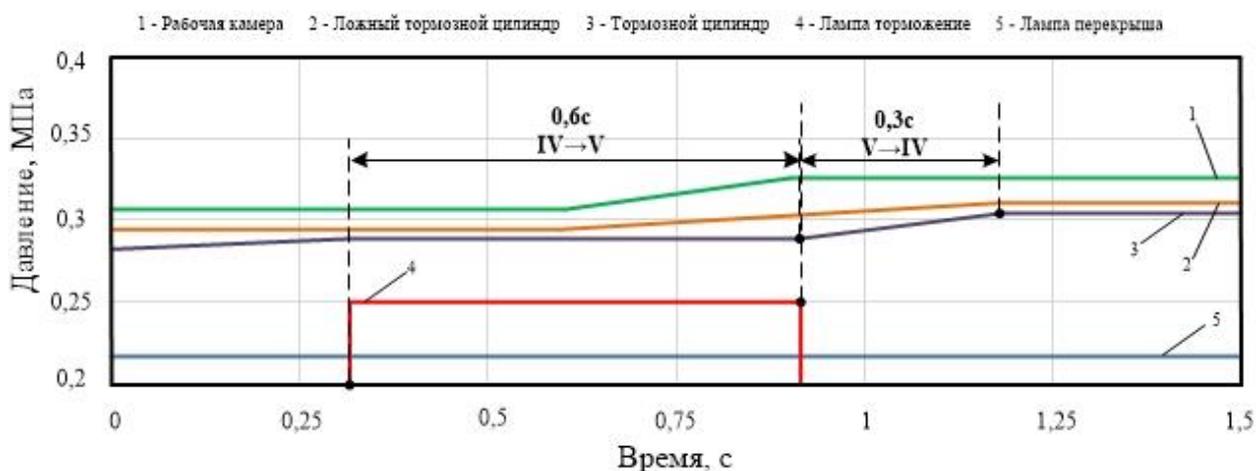
Из графика видно, что процесс торможения занял 6 с. Давление сжатого воздуха в ТЦ, ЛТЦ и рабочей камере воздухораспределителя достигло значения 0,305, 0,31 и 0,33 МПа соответственно. Время от подачи управляющего воздействия до момента начала газодинамических процессов в ТЦ составляет 0,7, 0,7 и 0,6 с в первой, второй и третьей ступени соответственно. Время между прекращением подачи управляющего воздействия и фиксацией давления в ТЦ составляет 1, 1, 0,3 с в первой, второй и третьей ступени соответственно.

Таким же образом можно рассмотреть и процесс отпуска тормозов, что является основным объектом наблюдения в этом эксперименте, рис. 7.



**Рис. 5.** Общий вид полного цикла торможения с применением алгоритма адаптивного управления тормозным нажатием  
**Fig. 5.** General view of the full braking cycle using the adaptive brake control algorithm



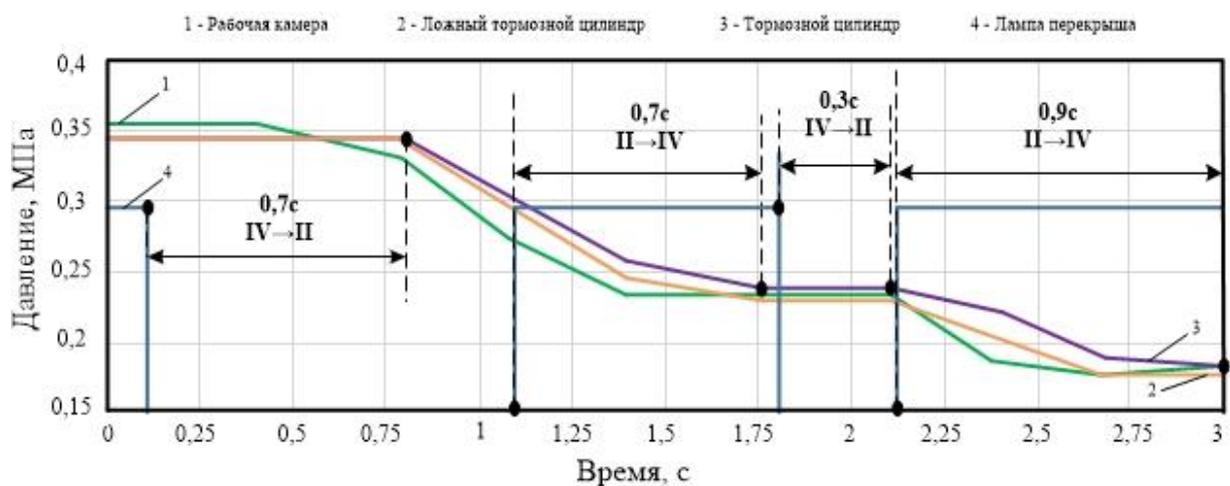


в

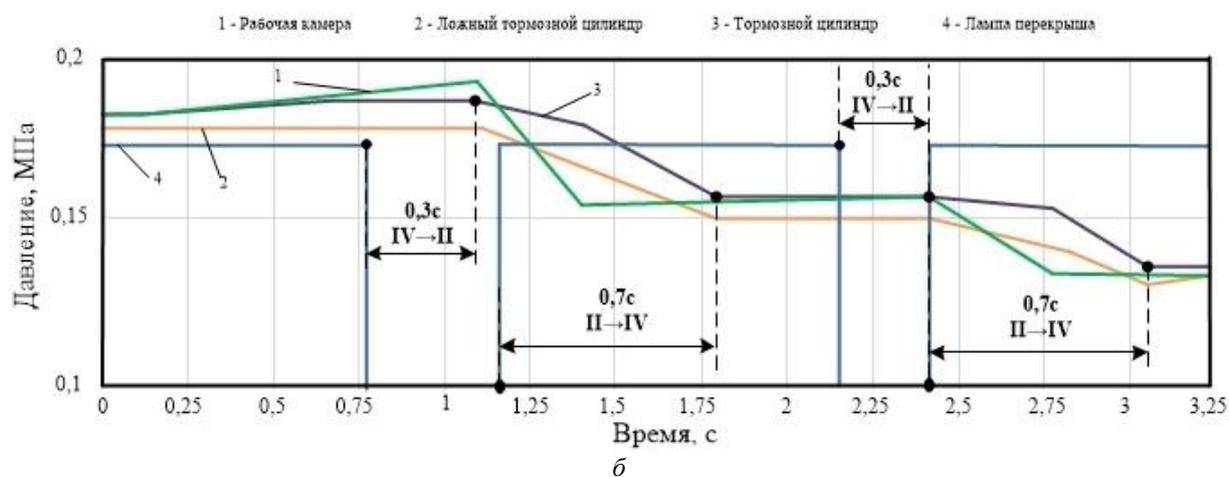
**Рис. 6.** Задержки, возникающие в тормозной системе при осуществлении ступенчатого наполнения тормозного цилиндра сжатым воздухом:  
*a* – начало торможения; *б* – вторая ступень торможения; *в* – третья ступень торможения

**Fig. 6.** Delays occurring in the braking system during the implementation of stepwise filling of the brake cylinder with compressed air:

*a* – the beginning of braking; *b* – the second stage of braking; *c* – the third stage of braking



а



б

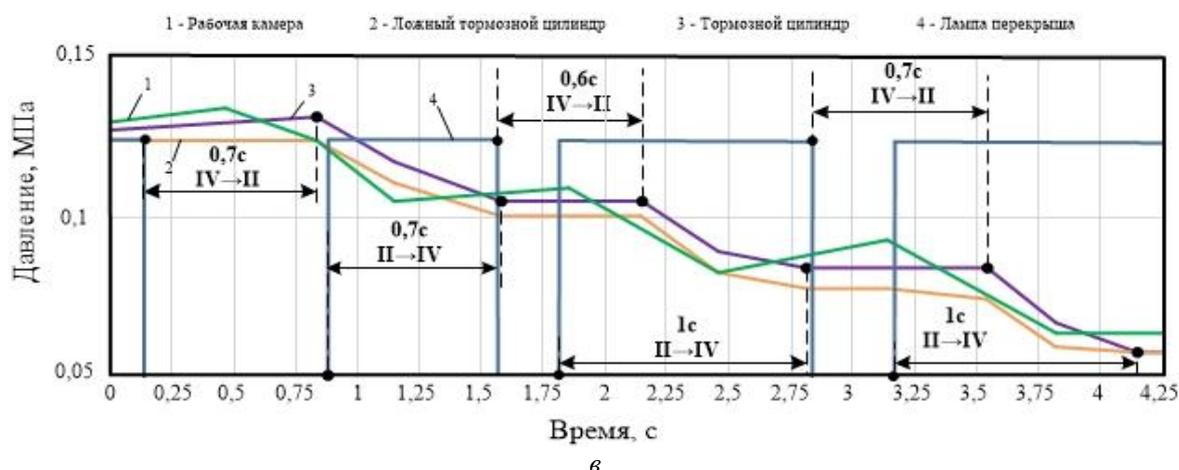


Рис. 7. Задержки, возникающие в тормозной системе при осуществлении ступени разрядки тормозного цилиндра:

*a* – первый интервал ступеней отпуска; *b* – второй интервал ступеней отпуска;  
*c* – третий интервал ступеней отпуска тормозов

Fig. 7. Delays occurring in the brake system during the discharge stage of the brake cylinder:

*a* – the first interval of the release stages; *b* – the second interval of the release stages;  
*c* – the third interval of the brake release stages

При ручном управлении удалось обеспечить отпуск в семь ступеней, что позволит выполнить алгоритм адаптации по скорости, значительно снизит вероятность заклинивания колесной пары и сократит тормозной путь. В процессе отпуска также выявлены задержки 0,7, 0,3, 0,3, 0,7, 0,6, 0,7 с между прекращением действия управляющего сигнала IV положения и началом разрядки ТЦ. Задержки между подачей управляющего воздействия IV положения и фиксацией давления в ТЦ составили 0,7, 0,9, 0,7, 0,7, 0,7, 1, 1 с.

Полученные результаты позволяют скорректировать алгоритм таким образом, чтобы обеспечить точное управление тормозной системой в процессе адаптивного торможения.

Устройство адаптивного управления тормозным нажатием должно выполнять проверку соответствия фактического и целевого давлений, которые должны находиться в установленных пределах. В случае возникновения разницы между фактическим и целевым значениями давления, превышающей установленные пределы, устройство выполнит дополнительную ступень отпуска либо торможения по необходимости.

## Заключение

По результатам экспериментальных исследований, представленных в данной публи-

кации, можно сделать вывод о наличии значимой при построении алгоритма временной задержке между управляющими воздействиями и откликом тормозной системы. Значимыми численными параметрами тормозной системы, полученными в результате исследования, стали средняя величина задержки времени при переводе ЭПТ из режима перекрыши в режим отпуска, составившая 0,7–0,9 с, при переходе ЭПТ из режима отпуска ТЦ в режим перекрыши задержка времени составила 0,25–0,35 с. Параметры задержки срабатывания для процесса торможения несколько отличаются от параметров отпуска. Так, среднее время задержки при переходе ЭПТ из режима зарядки и отпуска или перекрыши в режим торможения составило 0,7 с, что в целом схоже с режимом отпуска. При этом задержка при переходе из режима торможения в режим перекрыши составила 0,3–1 с, в среднем 0,77 с. Таким образом, при наполнении ТЦ процессы переключений элементов управления и исполнительных элементов имеют инерцию больше, чем при отпуске.

В последующих научных трудах планируются исследование газодинамических процессов, происходящих при экстренном торможении. Дальнейшее развитие исследований предполагает проведение поездного эксперимента на электропоезде ЭД9М, в ходе которого должна подтвердиться эффективность предлага-

емого алгоритма адаптивного управления тормозным нажатием при его реализации в ручном режиме на участке пути с нулевым уклоном. Также развитие получит и исследование по направлению влияния температуры на коэффи-

циент трения, которое не учитывается в существующих формулах при выполнении тормозных расчетов. Такие исследования проводятся как отечественными, так и зарубежными учеными [12–18].

### Список литературы

1. Стратегия развития Холдинга «РЖД» на период до 2030 года // Волгоградский Терком Роспрофжел : сайт. URL : <https://volgograd-terkom34.ru/wp-content/uploads/2017/05/Стратегия-развития-ОАО-РЖД-до-2030-года.pdf> (Дата обращения 14.11.2023).
2. Алгоритм адаптивного управления тормозным нажатием пассажирского подвижного состава / П.Ю. Иванов, Е.Ю. Дульский, А.А. Корсун и др. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2022. № 5. С. 6064.
3. Об утверждении правил тяговых расчетов для поездной работы : распоряжение ОАО «РЖД» от 12.05.16 № 867р (ред. 02.02.2018). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
4. Frea M., Tione R. Adaptive wheel slide protection algorithms. URL : [download.aspx?id=81470145-a0bc-4007-b100-75b39a0d6dbf](http://download.aspx?id=81470145-a0bc-4007-b100-75b39a0d6dbf) (Дата обращения 14.11.2023).
5. Универсальная система автоведения электровозов пассажирского движения. Руководство по эксплуатации // ООО «АВП Технология» : сайт. URL : [https://avpt.ru/upload/RE\\_USAVPP.pdf](https://avpt.ru/upload/RE_USAVPP.pdf) (Дата обращения 14.11.2023).
6. Крылов В.П., Крылов В.В. Автоматические тормоза подвижного состава. М. : Транспорт, 1983. 360 с.
7. Асадченко В.Р. Автоматические тормоза подвижного состава. М. : Маршрут, 2006. 392 с.
8. Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : приказ Минтранса России № 250 от 23.06.2022. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
9. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : утв. Советом по ж.-д трансп. государств-участников Содружества : протокол от 6-7 мая 2014 г. № 60 (приложение № 18). Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.
10. Сравнительный анализ тормозных систем подвижного состава с однострубно и двухтрубно питанием / П.Ю. Иванов, Е.Ю. Дульский, А.А. Хамнаева и др. // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 3 (79). С. 35–42.
11. Применение радиочастотного тракта для регистрации импульсных сигналов с пьезодатчика / О.В. Малышкина, С.И. Пугачев, С.О. Сегеда и др. // Морские интеллектуальные технологии. 2015. № 1-1(27). С. 49–53.
12. Исследование температуры тормозных колодок с разной степенью износа в процессе фрикционного торможения / П.Ю. Иванов, А. М. Худогов, Е. Ю. Дульский и др. // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 3 (47). С. 27–34.
13. A methodology to predict thermomechanical cracking of railway wheel treads: from experiments to numerical predictions / A. Esmaili, M.S. Walia, K. Handa et al. // International Journal of Fatigue. 2017. Vol. 105. P. 71–85.
14. Hamdaoui A., Jaddi El.H. Effects of the brake shoe friction material on the railway wheel damage // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 149. P. 1–4.
15. Tudor A., Radulescu C., Petre I. Thermal effect of the brake shoes friction on the wheel/rail contact // Tribology in industry. 2003. Vol. 25. P. 27–32.
16. Talati F., Jalalifar S. Analysis of heat conduction in a disk brake system // Heat Mass Transfer. 2009. Vol. 45. P. 1047–1059.
17. Schrader H.J. The friction of railway brake shoes at high speed and high pressure // University of Illinois bulletin. 1938. Vol. 35. No 72. URL : <https://core.ac.uk/download/pdf/4814283.pdf> (Дата обращения 14.11.2023).
18. Balotin J.G., Neis P.D., Ferreira N.F. Analysis of the influence of temperature on the friction coefficient of friction materials // ABCM Symposium Series in Mechatronics. 2010. Vol. 4. P. 898–906.

### References

1. Strategiya razvitiya Kholdinga «RZHD» na period do 2030 goda (Elektronnyi resurs) [Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030 (Electronic resource)]. Available at: <https://volgograd-terkom34.ru/wp-content/uploads/2017/05/Стратегия-развития-ОАО-РЖД-до-2030-года.pdf> (Accessed November 14, 2023).
2. Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu., Korsun A.A., Osipov D.V. Algoritm adaptivnogo upravleniya tormoznym nazhatiem passazhirskogo podvizhnogo sostava [Algorithm of adaptive control by braking of passenger rolling stock]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific Information Proceeding], 2022, no. 5, pp. 60–64.
3. Rasporyazhenie ОАО «RZHD» ot 12.05.16 № 867r «Ob utverzhdenii pravil tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty» (red. 02.02.2018) [Order of JSC «Russian Railways» dated May 12, 16 No 867r «On approval of the rules of traction calculations for train work» (ed. February 2, 2018)].
4. Frea M., Tione R. Adaptive wheel slide protection algorithms. URL : [download.aspx?id=81470145-a0bc-4007-b100-75b39a0d6dbf](http://download.aspx?id=81470145-a0bc-4007-b100-75b39a0d6dbf) (Accessed November 14, 2023).
5. Universal'naya sistema avtovedeniya elektrovozov passazhirskogo dvizheniya. Rukovodstvo po ekspluatatsii (elektronnyi resurs) [Universal system of wagon driving of electric locomotives of passenger traffic. Operation manual (electronic resource)]. Available at: [https://avpt.ru/upload/RE\\_USAVPP.pdf](https://avpt.ru/upload/RE_USAVPP.pdf) (Accessed November 14, 2023).
6. Krylov V.P., Krylov V.V. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava [Automatic brakes of rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1983. 360 p.

7. Asadchenko V.R. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava [Automatic brakes of rolling stock]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 392 p.
8. Prikaz Mintransa Rossii № 250 ot 23.06.2022 «Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznnykh dorog Rossiiskoi Federatsii» [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No 250 dated June 23, 2022 «On approval of the Rules of Technical Operation of Railways of the Russian Federation»].
9. Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: utv. Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva, protokol ot 6-7 maya 2014 g № 60 (prilozhenie № 18) [Rules for the maintenance of brake equipment and brake control of railway rolling stock : approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol no 60, dated May 6–7, 2014 (Annex no 18)].
10. Ivanov P.Yu., Dulskii E.Yu., Khamnaeva A.A., Korsun A.A., Treskin S.V. Sravnitel'nyi analiz tormoznykh sistem podvizhnogo sostava s odnotrubnym i dvukhtrubnym pitaniem [Comparative analysis of braking systems of rolling stock with single-tube and two-tube power supply]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2020, no. 3(79), pp. 35–42.
11. Malyshkina O.V., Pugachev S.I., Segeda S.O., Embil' I.A. Primenenie radiochastotnogo trakta dlya registratsii impul'snykh signalov s p'ezodatchika [Application of a radio frequency path for recording pulse signals from a piezo sensor]. *Morskije intellektual'nye tekhnologii* [Marine intelligent technologies], 2015, no. 1-1(27), pp. 49–53.
12. Ivanov P.Yu., Khudonogov A.M., Dulskii E.Yu., Korsun A.A., Treskin S.V. Issledovanie temperatury tormoznykh kolodok s raznoi stepen'yu iznosa v protsesse friktsionnogo tormozheniya [Investigation of the temperature of brake pads with different degrees of wear during friction braking]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2020, no. 3(47), pp. 27–34.
13. Esmacili A., Walia M.S., Handa K., Ikeuchi K., Ekh M., Vernersson T., Ahlström J. A methodology to predict thermo-mechanical cracking of railway wheel treads: from experiments to numerical predictions. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 105, pp. 71–85.
14. Hamdaoui A., Jaddi El.H. Effects of the brake shoe friction material on the railway wheel damage. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 149, pp. 1–4.
15. Tudor A., Radulescu C., Petre I. Thermal effect of the brake shoes friction on the wheel/rail contact. *Tribology in industry*, 2003, vol. 25, pp. 27–32.
16. Talati F., Jalalifar S. Analysis of heat conduction in a disk brake system. *Heat Mass Transfer*, 2009, vol. 45, pp. 1047–1059.
17. Schrader H.J. The friction of railway brake shoes at high speed and high pressure. *University of Illinois bulletin*, 1938, Vol. 35, no 72. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/4814283.pdf> (Accessed November 14, 2023).
18. Balotin J.G., Neis P.D., Ferreira N.F. Analysis of the influence of temperature on the friction coefficient of friction materials. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 2010, vol. 4, pp. 898–906.

#### Информация об авторах

**Корсун Антон Александрович**, аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: korsunanton1998@gmail.com.

#### Information about the authors

**Anton A. Korsun**, Ph.D. Student of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: korsunanton1998@gmail.com.