

## Моделирование расхода сжатого воздуха пневматических систем на примере работы тормозов поезда в режиме зарядки и отпуска

А.А. Хамнаева✉

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

✉alenalend95@mail.ru

### Резюме

В статье рассматриваются вопросы моделирования пневматических процессов, универсальности пневматических систем применительно к различным отраслям экономики. Моделирование выполнено на примере пневматической тормозной системы грузового отечественного подвижного состава, для чего рассмотрена схема тормозного оборудования поезда с основными тормозными приборами и проанализированы направления движения воздуха по воздухопроводам в основных режимах. При создании модели использован подход с аппроксимацией экспериментальных данных путем выбора математической функции и подбора ее параметров. Моделирование направлено на решение частной задачи определения изменения расхода сжатого воздуха в тормозной системе подвижного состава по давлению в источнике (в главном резервуаре) для двух режимов работы: зарядка тормозов и поддержание зарядного давления в тормозной магистрали при поездном режиме. Пневматическая система поезда может работать в режиме потребления для насыщения сжатым воздухом тормозных приборов, что предполагает нестационарный характер процесса. Наряду с этим тормозная система может работать в режиме компенсации утечек сжатого воздуха из-за недостаточной плотности в соединениях, что предполагает стационарный характер течения процесса. В силу таких особенностей работы пневматической системы были предложены два уравнения для стационарного и нестационарного режимов. Представленное решение моделирования расхода сжатого воздуха по снижению давления в источнике помимо железнодорожного подвижного состава применимо для аналогичных пневматических систем общепромышленного назначения.

### Ключевые слова

подвижной состав железных дорог, пневматические тормоза подвижного состава, тормозная система подвижного состава, стационарные пневматические процессы, нестационарные пневматические системы, цифровой двойник поезда

### Для цитирования

Хамнаева А.А. Моделирование расхода сжатого воздуха пневматических систем на примере работы тормозов поезда в режиме зарядки и отпуска / А.А. Хамнаева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 130–138. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).130-138.

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 1.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 7.09.2022 г.; принята к публикации: 8.09.2022 г.

## Modeling of the compressed air consumption in the pneumatic systems on the example of the train brakes operation during charging and release mode

А.А. Khamnaeva✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉alenalend95@mail.ru

### Abstract

The article considers the issue of modeling the pneumatic processes and the universality of pneumatic systems in relation to various sectors of the economy. The simulation is carried out illustrated with the example of the pneumatic braking system of domestic freight rolling stock, for which the scheme of the train's braking equipment with the main braking devices is considered and the directions of air movement through the ducts in the main modes are analyzed. When creating the model, an approach was used with the approximation of experimental data by choosing a mathematical function and selecting its parameters. The simulation was aimed at solving a particular problem of determining the change in the flow of compressed air in the braking system of rolling stock by the pressure in the source (in the main tank) for two modes of operation: charging the toruses and maintaining the charging pressure in the brake line during train mode. The pneumatic system of the train can operate in the consumption mode to saturate the brake devices with compressed air, which implies a non-stationary character of the process. At the same time, the braking system can operate in the mode of compensation for compressed air leaks due to loose joints, implying the stationary nature of the process. Due to these features of the operation of the pneumatic system, two equations were proposed for stationary and non-stationary modes. The proposed solution for modeling the flow of compressed air to reduce the pressure in the source, aside from railway rolling stock, is applicable for similar pneumatic systems of general industrial use.

**Keywords**

rolling stock of railways, pneumatic brakes of rolling stock, rolling stock braking system, stationary pneumatic processes, non-stationary pneumatic systems, digital twin of the train

**For citation**

Khamnaeva A.A. Modelirovanie raskhoda szhatogo vozdukha pnevmaticheskikh sistem na primere raboty tormozov poezda v rezhime zaryadki i otpuska [Modeling of the compressed air consumption in the pneumatic systems on the example of the train brakes operation during charging and release mode]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 130–138. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).130-138.

**Article Info**

Received: September 1, 2022; Revised: September 7, 2022; Accepted: September 8, 2022.

**Введение**

Пневматика, наряду с гидравликой, широко применяется как для автоматизации различных производственных процессов на предприятиях, так и в автоматических тормозных системах поездов по всему миру [1–5]. Неоспоримыми плюсами использования пневмооборудования являются надежность и экологическая чистота (пневматика использует воздух), вследствие чего пневматические машины лучше защищены от перегрузок, что, в свою очередь, обеспечивает безопасность, а возможность создания сжатого воздуха прямо на локомотиве позволяет сохранять тормозную систему в работоспособном состоянии несмотря на утечки [6, 7].

Промышленная пневматика в том или ином виде используется в следующих отраслях экономики: железнодорожный транспорт; металлургия; горнодобывающая промышленность; машиностроение; пищевая индустрия; химическая промышленность; легкая промышленность; складское дело.

Наряду с железнодорожным транспортом пневматические клапаны используются в трубопроводных распределительных сетях для перенаправления потоков жидкостей и газов. Сжатый воздух отключает и включает высоковольтные выключатели на электрических подстанциях. Без пневматики не обходится ни одно современное транспортное средство промышленного назначения и грузовые большегрузные автомобили. Спектр применения пневматического оборудования очень широк [8].

Конфигурация пневматических систем может быть абсолютно различной и включать в себя как однообразные приборы, работающие в одинаковых режимах, так и абсолютно различные по характеру потребления сжатого воздуха пневматические системы [9, 10]. В состав типовой пневматической системы входят следующие элементы: компрессор; пневмопровода; пневма-

тические распределители; пневмоцилиндры исполнительных механизмов.

В систему включаются отдельные емкости (резервуары) для сжатого воздуха, в большинстве случаев баллоны для него входят в комплектацию компрессора и собираются с ним в одном корпусе.

Одним из сложнейших видов пневматических систем является тормозная система железнодорожного подвижного состава [11, 12]. При эксплуатации пневматических систем часто возникает вопрос о необходимости контроля расхода сжатого воздуха в процессе работы технологических линий, либо определения возникающих неисправностей [6, 7, 13]. Для реализации данных направлений работы есть несколько путей:

1. Установка различного рода датчиков давления, расходомеров и других контролируемых приборов по всей системе. Такой вид контроля за расходом ресурсов пневмолиний и контроля ее исправностей является дорогостоящим и ненадежным. Чаще выходить из строя начинают приборы контроля, нежели какие-либо контролируемые элементы пневмолиний.

2. Создание систем мониторинга на основании моделирования процессов, происходящих в пневмосистеме и расстановке датчиков в математической модели. Такая технология также широко известна как цифровой двойник. Основным вопросом использования данной технологии является создание математических моделей функционирования системы [7, 11]. В случае с пневматическими системами – это математические модели газодинамических процессов.

При создании математических моделей газодинамических процессов важно учитывать, что моделирование должно предполагать наиболее простые математические зависимости. На сегодняшний день существуют различные методы и расчетные среды газодинамики и

пневматики, однако данные системы применимы в основном для проектирования, их расчеты занимают много времени, требуют большой экспериментальной и инженерной проработки. Для создания математических моделей с целью реализации технологий цифрового двойника, при решении задач диагностики и контроля расхода воздуха необходимо применение более простых уравнений, которые легко могли бы рассчитываться микропроцессорами со средней производительностью, т. е. широкодоступных на рынке компьютерной техники.

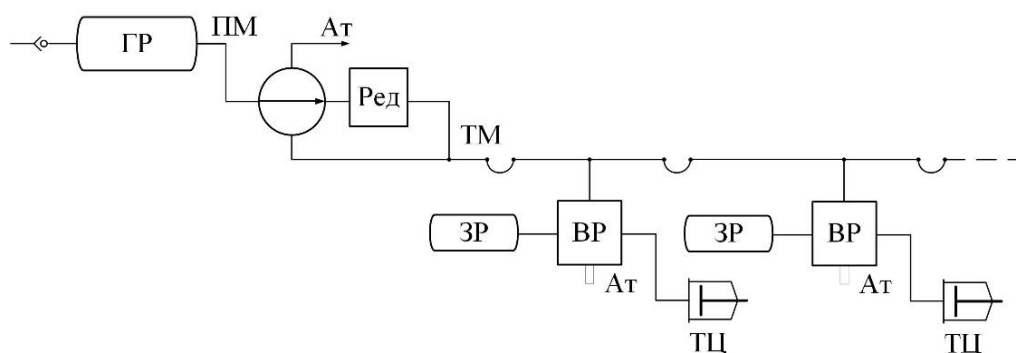
### Описание объекта, постановка задачи

В данной статье рассматривается решение частной задачи по моделированию процесса изменения расхода сжатого воздуха в тор-

можной системе подвижного состава (рис. 1). Конкретно будет производиться моделирование процесса изменения давления в источнике (в главном резервуаре), в случае, если пневматическая система начинает работать в режиме потребления, при этом характер потребителей является нестационарным [7, 14, 15]. В пневматической системе происходит множество процессов, поэтому сконцентрируемся на конкретном примере.

Рассмотрим модель, относящуюся к процессу восстановления давления в тормозной системе состава, и приведем пример для решения задачи.

Для процесса восстановления давления в тормозной магистрали поезда характерно заполнение объемов – потребителей, которыми



**Рис. 1.** Схема тормозной системы подвижного состава:

МК – мотор-компрессор; ГР – главный резервуар; ПМ – питательная магистраль;

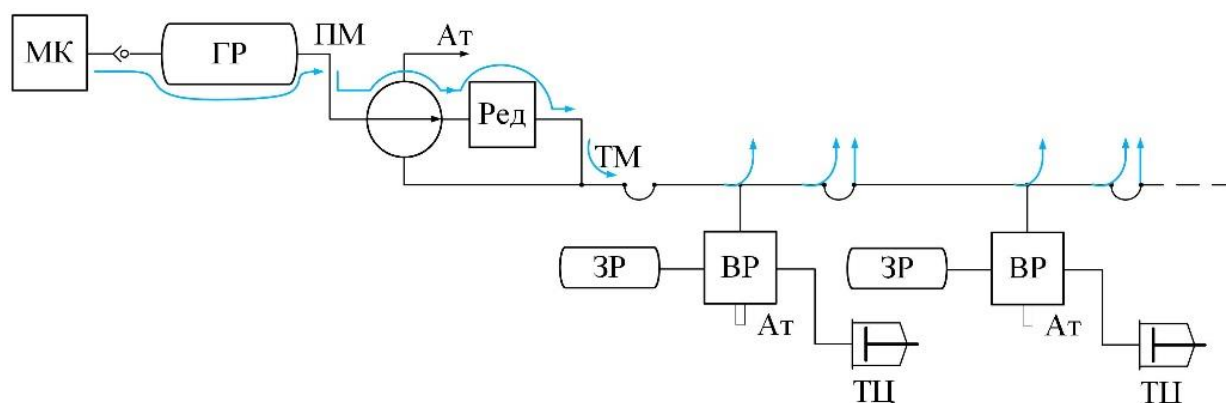
Ат – атмосфера; Ред – редуктор; ТМ – тормозная магистраль;

ВР – воздухораспределитель; ЗР – запасный резервуар; ТЦ – тормозной цилиндр

**Fig. 1.** Diagram of the rolling stock braking system:

МК – motor-compressor; ГР – main tank; ПМ – feeding line; Ат – atmosphere; Ред – reducer;

ТМ – brake line; ВР – air distributor; ЗР – spare tank; ТЦ – brake cylinder



**Рис. 2.** Схема движения сжатого воздуха в тормозной системе при стационарном потоке из главного резервуара в поездном режиме работы тормозной системы и в режиме перекрыши

**Fig. 2.** Diagram of the compressed air movement in the braking system under a stationary flow from the main tank in the train and overlap operation mode of the braking system

выступают запасные резервуары и камеры воздухораспределителей, расположенные на вагонах, при этом период заполнения сжатым воздухом потребителей дольше, чем период восстановления давления в главных резервуарах компрессором. Кроме того, система негерметична, как и любая пневмолиния, что создает постоянное стационарное течение воздуха – потери на поддержание рабочего давления в системе [11, 16, 17].

Постоянные потери воздуха в системе приводят к тому, что в источнике сжатого воздуха давление постоянно снижается, схема движения сжатого воздуха представлена на рис. 2. Данный процесс характерен для поездного режима работы тормозной системы подвижного состава и перекрыши [6, 7]. В случае, когда пневмооборудование не работает в режиме торможения или в режиме зарядки, график снижения давления в главном резервуаре имеет постоянную форму, и если рассматривать соседние циклы снижения давления в главных резервуарах и откачки, то они идентичны по форме (рис. 3).

При этом время всех циклов соответствует выражению (1):

$$\Delta t_{c1} = \Delta t_{c2} = \Delta t_{c3}, \quad (1)$$

где  $\Delta t_{ci}$  – время снижения давления в главных резервуарах между откачками компрессора.

### Математическое моделирование

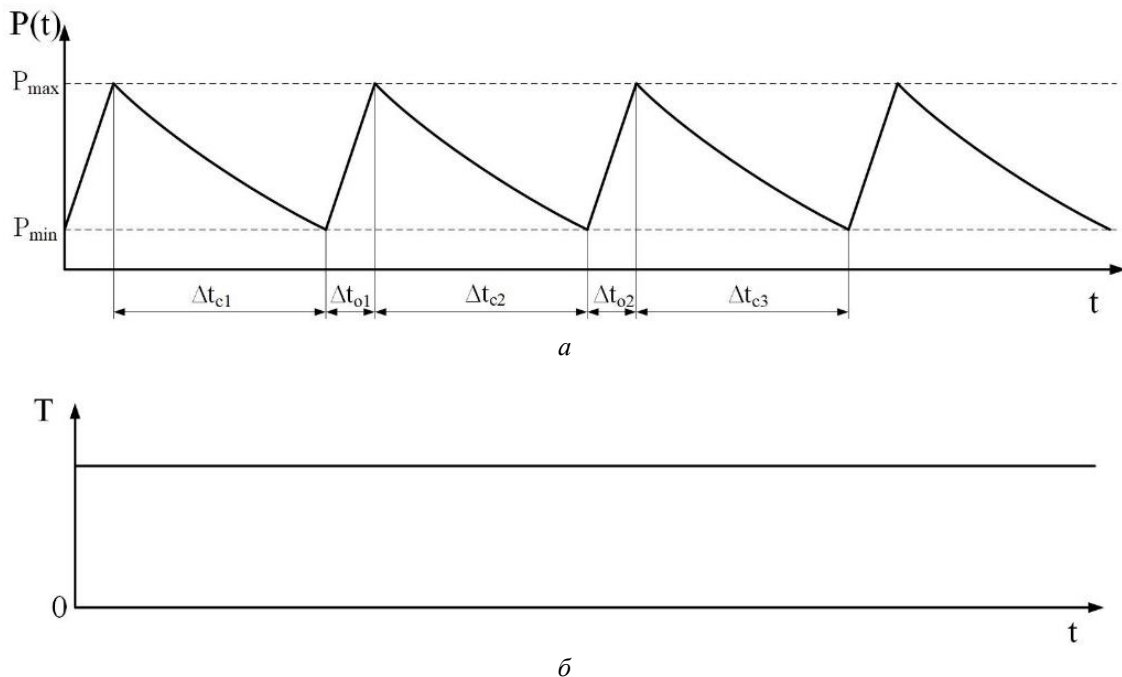
Если рассматривать рис. 3, где потребление сжатого воздуха происходит с постоянной интенсивностью за счет утечек, то его можно описать функцией (2):

$$P(t) = P_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (2)$$

где  $P_{\max}$  – максимальное значение давления в главных резервуарах;  $e$  – оператор экспоненциальной функции;  $t$  – текущее время;  $T$  – параметр времени процесса снижения давления в главных резервуарах.

В данном случае  $T = \text{const}$  для всех циклов откачки как показано на графике (см. рис. 3, б).

При повышении расхода воздуха, связанного с восстановлением израсходованного за-



**Рис. 3.** Графическое изображение основных динамических параметров давления и времени при стационарном процессе в зависимости от времени:

*a* – давление в главных резервуарах; *б* – зависимость параметра времени процесса снижения давления в главных резервуарах

**Fig. 3.** Graphical representation of the main dynamic parameters of pressure and time in a stationary time dependent process:  
*a* – pressure in the main tanks; *b* – dependence of the time parameter on the pressure reduction process in the main tanks

паса энергии газа в пневматических приборах, фронт снижения кривой давления в главных резервуарах становится круче (рис. 4, а). При этом за несколько циклов откачки компрессора скорость снижения давления в главных резервуарах восстанавливается [18]. Время всех циклов соответствует выражению (3):

$$\Delta t_{c1} \langle \Delta t_{c2} \langle \Delta t_{c3}, \quad (3)$$

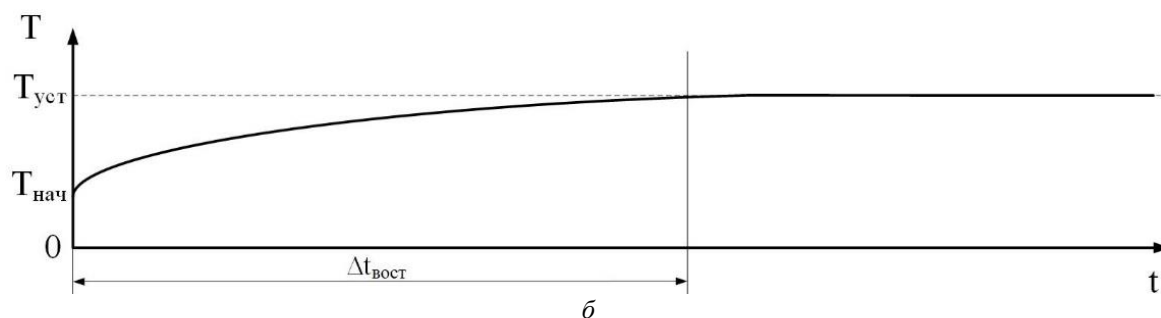
Для такого процесса характерен нестационарный поток воздуха, выходящий из главного резервуара, направленный на заполнение тормозных приборов (рис. 5), такая схема свойственна для режима отпуска тормозов.

Если рассматривать графики на рис. 4, где идет насыщение сжатым воздухом потребителей, параметр времени процесса  $T$  приобретает переменный характер. Данный параметр зависит от удельного расхода сжатого воздуха, его можно попытаться рассчитать при помощи экспери-

ментальных данных или фундаментальных уравнений, однако оба этих метода имеют определенную сложность [5, 17]. Если рассматривать процесс математически, то наиболее простым для моделирования процесса является подбор функций изменения данной величины, т. е. если говорить о том, что процесс на рис. 3 является стационарным, так как поток во времени постоянен, а процесс на рис. 5 – нестационарным, то это указывает на то, что показатель в экспоненциальной функции  $T$  будет переменной величиной, тогда необходимо заменить параметр  $T$  функцией, описывающей график на рис. 4, б.

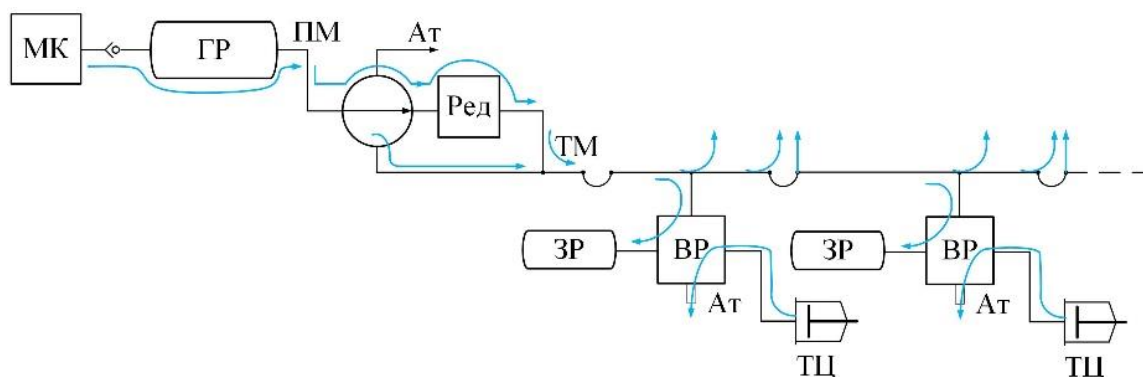
Насыщение сжатым воздухом тормозной системы можно описать по рис. 4, б.

Появляется цель подобрать функцию, описывающую график (см. рис. 4, б), т. е. произвести его аппроксимацию. Рассмотрев варианты функций, подходящей принята гипербола, по-



**Рис. 4.** Графическое изображение основных параметров изменения давления при нестационарном процессе в зависимости от времени: а – давление в главных резервуарах; б – зависимость параметра времени процесса снижения давления в главных резервуарах;

**Fig. 4.** Graphical representation of the main parameters of time dependent pressure changes in a non-stationary process depending on time: а – pressure in the main tanks; б – dependence of the time parameter on the pressure reduction process in the main tanks



**Рис. 5.** Схема движения сжатого воздуха в тормозной системе при нестационарном потоке из главного резервуара в режиме отпуска тормозов

**Fig. 5.** Diagram of the compressed air movement of compressed air in the brake system with an unsteady flow from the main tank in the brake release mode

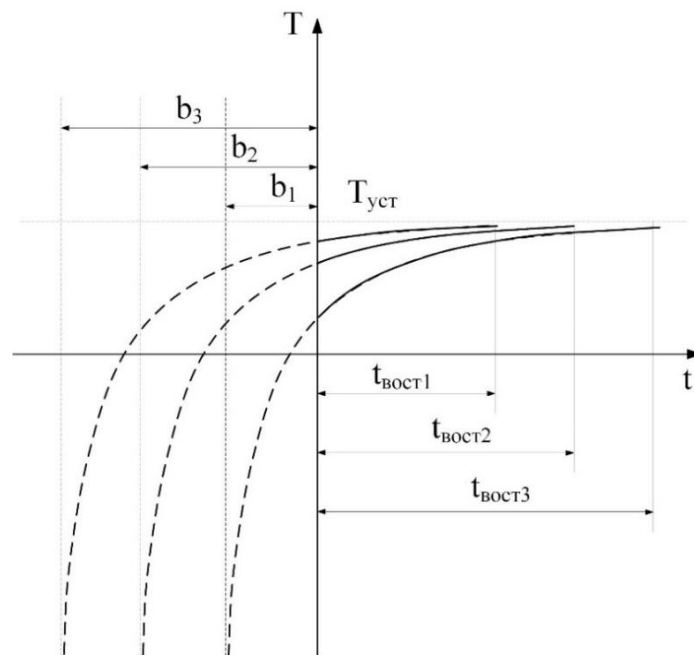
сколькx обладает гибкостью при различных вариантах изменения параметра времени процесса. Так как целью моделирования является создание цифрового двойника, дополнительным плюсом использования функции гиперболы является возможность перемещения ее вдоль оси абсцисс без изменения формы (рис. 6).

Время установления стационарного потока сжатого воздуха из главных резервуаров зависит от степени истощения тормозной системы в процессе торможения. Считаем, что система восстановилась после торможения в момент, когда параметр времени процесса примет постоянное значение равное  $T_{уст}$ . Чем больше

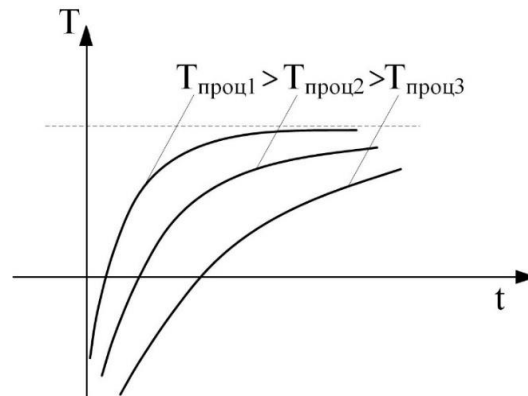
степень истощения, тем больше времени требуется для восстановления давления тормозных приборов и запасных резервуаров.

Время восстановления  $t_{восст}$  зависит от глубины разрядки при торможении (рис. 6), а изменение функции при различных значениях  $t_{восст}$  происходит за счет параметра  $b$ .

Параметром  $T_{проц}$  можно изменять величину первой производной  $dP / dt$ , которая зависит от объема главных резервуаров, интенсивности утечек и объема потребителей. Влияние  $T_{проц}$  на форму кривой моделируемой функции показано на рис. 7.



**Рис. 6.** Графики гиперболической функции, описывающие динамику параметра времени процесса при отпуске тормозов после разрядок различной величины  
**Fig. 6.** Graphs of the hyperbolic function describing the dynamics of the process time parameter when the brakes are released after discharges of various magnitude



**Рис. 7.** Графики гиперболической функции при изменении нестационарного процесса  
**Fig. 7.** Graphs of a hyperbolic function under a non-stationary process changing

С учетом сказанного гиперболическая функция, описывающая параметр времени процесса  $T(t)$ , примет вид, указанный в выражении (4):

$$T(t) = T_{\text{уст}} - \frac{T_{\text{проц}}}{t+b}, \quad (4)$$

где  $T_{\text{уст}}$  – установившееся значение времени процесса, характерное для стационарного процесса;  $T_{\text{проц}}$  – параметр времени, характеризующий интенсивность процесса восстановления давления в тормозной магистрали;  $t$  – время;  $b$  – параметр, характеризующий время восстановления стационарного потока из главных резервуаров.

Переменные, входящие в состав функции (4) показаны на рис. 8.

Так как планируется использовать приведенную математическую модель для технологии цифрового двойника процесса восстановления сжатого воздуха из главного резервуара, все переменные должны замеряться при помощи датчиков либо вычисляться на основании замеров [7, 18].

Значения переменных  $T_{\text{нач}}$ ,  $T_{\text{уст}}$ ,  $t_{\text{вост}}$  возможно снять при помощи датчиков, а  $T_{\text{проц}}$ ,  $b$  – необходимо вычислять на основании замеренных переменных. Для их вычисления были выведены выражения.

Параметр, характеризующий время восстановления стационарного потока из главных резервуаров  $b$  можно определить при помощи вы-

ражения (5):

$$b = \frac{T_{\text{проц}}}{T_{\text{уст}} - T_{\text{нач}}}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{нач}}$  – параметр времени процесса в момент начала отпуска тормозов.

Параметр, определяющий величину параметра времени процесса  $T$  относительно ее установившегося значения, при котором процесс восстановления считается завершенным, определяется по (6):

$$a = 1 - k \quad (6)$$

где  $k = 0,9 - 0,95$  – коэффициент параметра  $a$ .

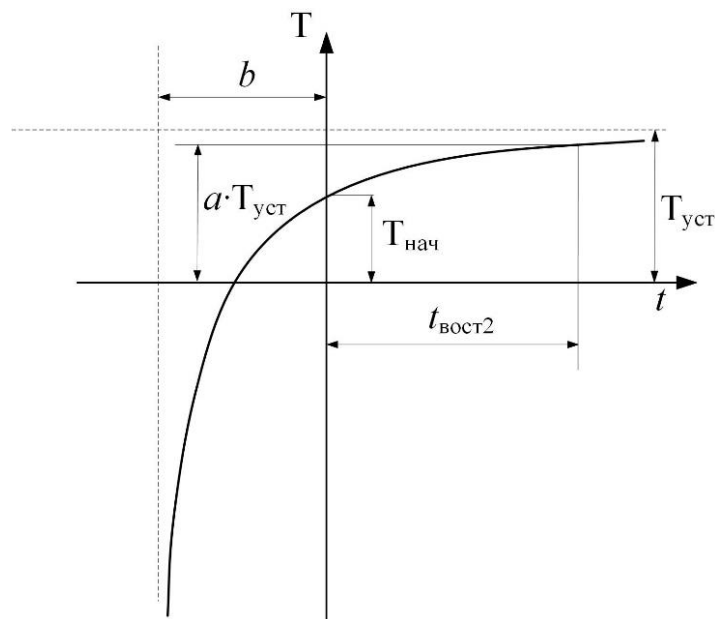
Параметр времени, характеризующий интенсивность процесса восстановления давления в тормозной магистрали, определяется по выражению (7):

$$T_{\text{проц}} = \frac{(1-k) \cdot T_{\text{уст}} \cdot t_{\text{вост}}}{\left(1 + \frac{(1-k) \cdot T_{\text{уст}}}{T_{\text{уст}} - T_{\text{нач}}}\right)}, \quad (7)$$

Чтобы описать функцию снижения давления в главных резервуарах  $P(t)$ , подставим в (2) выражение (4) и отразим результат уравнения в выражении (8):

$$P(t) = P_{\text{max}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{уст}} - \frac{T_{\text{проц}}}{t+b}}}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{max}}$  – максимальное значение давления в главных резервуарах;  $e$  – оператор экспоненциальной функции;  $t$  – текущее время;  $T_{\text{уст}}$  – установившееся значение времени процесса, свой-



**Рис. 8.** Переменные математической модели, характеризующие функцию параметра времени процесса  $T(t)$   
**Fig. 8.** Variables of the mathematical model characterizing the function of the time parameter of the process  $T(t)$

ственное для стационарного процесса;  $T_{\text{проц}}$  – параметр времени, характеризующий интенсивность процесса восстановления давления в тормозной магистрали;  $b$  – параметр, определяющий время восстановления стационарного потока из главных резервуаров.

В ходе аппроксимации функции было получено выражение (8) для моделирования процесса снижения давления в главных резервуарах при нестационарном процессе.

### Заключение

Полученная функция позволит реализовать элемент технологии цифрового двойника, а именно, в режиме реального времени на ос-

новании полученных функций смоделировать нестационарный процесс снижения давления в главных резервуарах в ходе насыщения сжатым воздухом тормозной системы поезда после торможения [7, 9]. Результаты моделирования система диагностики или управления должны сравнивать с реальными значениями, полученными при помощи датчиков и далее на основании совпадения или расхождения результатов делать выводы или определять управляющее воздействие. Полученный результат может быть применим как к тормозной системе подвижного состава, так и к другим пневматическим цепям с аналогичной структурой.

### Список литературы

1. Исследование температуры тормозных колодок с разной степенью износа в процессе фрикционного торможения / П.Ю. Иванов, А.М. Худонов, Е.Ю. Дульский и др. // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 3 (47). С. 27–34.
2. Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness / P. Ivanov, A. Khudonogov, E. Dulskiy et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. P. 012086. DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012086.
3. Abbasia S., Teimourimaneshb Sh., Vernerssonb T. Temperature and thermoelastic instability at tread braking using cast iron friction material // Wear. 2013. Vol. 314. P. 171–180.
4. A. Hamdaoui, El.H. Jaddi. Effects of the brake shoe friction material on the railway wheel damage // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 149. P. 1–4.
5. Petersson M. Two-dimensional finite element simulation of the thermal problem at railway block braking // Mechanical Engineering Science. 2015. Vol. 216. P. 259–273.
6. Применение аддитивных технологий при проектировании и изготовлении автотормозного оборудования / Н.С. Горбунова, Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов и др. // Молодая наука Сибири. 2021. № 1 (11). С. 44–50. URL <https://mnv.irgups.ru/en/node/754> (дата обращения 04.03.2022).
7. Система диагностики тормозной сети поезда / А.М. Худонов, Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов и др. // Локомотив. 2019. № 4 (748). С. 30–31.
8. Кузнецов Ю.В., Кузнецов М.Ю. Сжатый воздух. Екатеринбург : УрОРАН, 2007. 510 с.
9. Исследование работы стабилизатора крана машиниста условный № 395 / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский и др. // Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств : материалы второй всерос. науч.-техн. конф. Омск, 2017. С. 62–69.
10. Особенности построения систем управления с применением технологии «цифровой двойник» на основе микроконтроллеров «Миландр» / Н.О. Дробышев, П.Ю. Иванов, С.В. Ковыршин и др. // Молодая наука Сибири : электрон. журн. 2020. № 2 (8). С. 264–269.
11. Карвацкий Б.Л. Общая теория автотормозов. М. : Трансжелдориздат, 1947. 299 с.
12. Об утверждении правил тяговых расчетов для поездной работы : распоряжение ОАО «РЖД» 867р от 12.05.2016 : в ред. 02.02.2018. М. : ОАО «РЖД», 2016. 515 с.
13. Иванов П.Ю., Корсун А.А., Емельянов Д.О. Существующие способы управления тормозным нажатием с повышенной эффективностью // Научные междисциплинарные исследования : сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. Саратов, 2021. С. 28–36.
14. Пудовиков О.Е., Муров С.А. Совершенствование системы автоматического управления пневматическим тормозом грузового длинносоставного поезда // Транспорт: наука, техника, управление. 2014. № 4. С. 21–26.
15. Иванов П.Ю., Мануилов Н.И., Дульский Е.Ю. Причины самопроизвольного срабатывания автотормозов в грузовых поездах // Известия Транссиба. 2017. № 2(30). С. 17–25.
16. Зарубежный опыт повышения эффективности пневматических тормозов / П.Ю. Иванов, Е.Ю. Дульский, Н.И. Мануилов и др. // Локомотив. 2020. № 11(767). С. 36–37.
17. Сравнительный анализ тормозных систем подвижного состава с однотрубным и двухтрубным 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.
18. Мануилов Н.И. Совершенствование методов и средств диагностики тормозной сети поезда : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2019. 190 с.

### References

1. 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.

2. Ivanov P., Khudonogov A., Dulskiy E. et al. Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. P. 012086. DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012086.

3. Abbasia S., Teimourimaneshb Sh., Vernerssonb T. Temperature and thermoelastic instability at tread braking using cast iron friction material. *Wear*, 2013, vol. 314, pp. 171–180.

4. A. Hamdaoui, El.H. Jaddi. Effects of the brake shoe friction material on the railway wheel damage. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 149, pp. 1–4.

5. Petersson M. Two-dimensional finite element simulation of the thermal problem at railway block braking. *Mechanical Engineering Science*, 2015, vol. 216, pp. 259–273.

6. Gorbunova N.S., Dulskii E.Yu., Ivanov P.Yu., Khamnaeva A.A., Novikov N.N. Primenenie additivnykh tekhnologii pri proektirovani i izgotovlenii avtotormoznogo oborudovaniya [Application of additive technologies in the design and manufacture of auto-braking equipment]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2021, no. 1(11), pp. 44–50.

7. Khudonogov A.M., Dulskii E.Yu., Ivanov P.Yu., Manuilov N.I., Stasevich I.A. Sistema diagnostiki tormoznoi seti poezda [Diagnostic system of the train braking network]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2019, no. 4(748), pp. 30–31.

8. Kuznetsov Yu.V., Kuznetsov M.Yu. Szhatyi vozdukh [Compressed air]. Ekaterinburg: UrORAN RAN, 2007. 510 p.

9. Ivanov P.Yu., Manuilov N.I., Dulskii E.Yu., Khudonogov A.M. Issledovanie raboty stabilizatora krana mashinista usloynyi № 395 [Investigation of the operation of the crane stabilizer of the machinist conditional no 395]. *Materialy vtoroi vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Innovatsionnye proekty i tekhnologii mashinostroitel'nykh proizvodstv»* [Proceedings of II All-Russian Scientific and Technical Conference «Innovative projects and technologies of machine-building industries»]. Omsk, 2017, pp. 62–69.

10. Drobyshev N.O., Ivanov P.Yu., Kovyrshin S.V., Kruglov S.P. Osobennosti postroyeniya sistem upravleniya s primeneniem tekhnologii «tsifrovoy dvoynik» na osnove mikrokontrollerov «Milandr» [Features of the construction of control systems using the technology «digital twin» based on microcontrollers «Milander»]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2020, no. 2(8), pp. 264–269.

11. Karvatskii B.L. Obshchaya teoriya avtotormozov [The general theory of auto brakes]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1947. 299 p.

12. Rasporyazhenie OAO «RZhD» 867r ot 12.05.2016 (red. 02.02.2018) «Ob utverzhdenii pravil tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty» [Order of JSC «Russian Railways» 867r dated 12.05.2016 (ed. 02.02.2018) «On approval of the rules of traction calculations for train work»]. Moscow: RZhD Publ., 2016. 515 p.

13. Ivanov P.Yu., Korsun A.A., Emelyanov D.O. Sushchestvuyushchie sposoby upravleniya tormoznym nazhatiem s povyshennoy effektivnost'yu [Existing methods of brake pressure control with increased efficiency]. *Sbornik statei XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnye mezhdistitsiplinarnye issledovaniya»* [Proceedings of XV International Scientific and Practical Conference «Scientific interdisciplinary research»]. Saratov, 2021, pp. 28–36.

14. Pudovikov O.E., Murov S.A. Sovershenstvovanie sistemy avtomaticheskogo upravleniya pnevmaticheskimi tormozom gruzovogo dlinnosostavnogo poezda [Improvement of the automatic control system of the pneumatic brake of a freight long-composite train]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information proceeding], 2014, no. 4, pp. 21–26.

15. Ivanov P.Yu., Manuilov N.I., Dulskii E.Yu. Prichiny samoproizvol'nogo srbatyvaniya avtotormozov v gruzovykh poezdakh [The causes of spontaneous operation of auto brakes in freight trains]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2017, no. 2(30), pp. 17–25.

16. Ivanov P.Yu., Dulskii E.Yu., Manuilov N.I., Khudonogov A.M., Khamnaeva A.A., Korsun A.A., Novikov N.N., Treskin S.V. Zarubezhnyi opyt povysheniya effektivnosti pnevmaticheskikh tormozov [Foreign experience in improving the efficiency of pneumatic brakes]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2020, no. 11(767), pp. 36–37.

17. 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 dvukhtubnym 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.

18. Manuilov N.I. Sovershenstvovanie metodov i sredstv diagnostiki tormoznoi seti poezda [Improvement of methods and diagnostic tools of the train braking network]. Ph.D's thesis. Irkutsk, 2019. 190 p.

### Информация об авторах

**Хамнаева Алёна Александровна**, аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: alenalend95@mail.ru.

### Information about the authors

**Alena A. Khamnaeva**, Ph.D student of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: alenalend95@mail.ru.