

## Транспортные системы Transport systems

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 62-192; 621.8-1/-9; 620.178.4/.6

doi: 10.30987/2782-5957-2024-5-29-39

### ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПОГЛОЩАЮЩЕГО АППАРАТА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЕГО БЕЗОТКАЗНОСТЬ

Игорь Олегович Романов<sup>1✉</sup>, Александр Владимирович Лукьянчук<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

<sup>1</sup> ig\_romanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0647-1677>

<sup>2</sup> avl80@yandex.ru

#### Аннотация

В проблеме обеспечения качества машиностроительной продукции важное место занимают вопросы планирования и обеспечения заданного уровня надежности механических систем на всех этапах их создания и эксплуатации. При значительном количестве научных методов и подходов решения теоретических и прикладных вопросов теории надежности одно из ключевых направлений занимает определение показателей безотказности технических систем и их элементов, в частности широкой номенклатуры изделий, включающих пары трения скольжения с периодическими ударными воздействиями.

Исследование природы возникновения отказов, с точки зрения, физико-механических процессов, протекающих в поверхностных слоях элементов, под воздействием внешних факторов, позволяет провести выбор параметров, характеризующих работоспособное состояние пары, и, как следствие, ее безотказность. К примеру, для пар трения скольжения с периодическим ударными воздействиями, таким параметром являются геометрические размеры сопряженных элементов.

Уменьшение геометрических размеров контактируемых элементов, вследствие износа, харак-

теризует скорость изменения начальных значений параметров до предельно допустимых, определяющих отказ, и может быть аппроксимировано линейной, степенной, экспоненциальной и др. зависимостями, получаемыми при фактических измерениях. По полученным функциональным зависимостям изменения параметра во времени наработки становится возможным определение нормы на параметр, регламентирующей их предотказное состояние, при выходе за которую с различной вероятностью возможно прогнозирование отказов, и, как следствие, надежности системы в целом.

Использование подобного методического подхода прогнозирования надежности через определение предотказного состояния системы, возможно проецировать на технические объекты, показателями работоспособности которых являются геометрические параметры, обеспечивающие выполнение, в первую очередь, функций самих элементов и всей технической системы в целом, и изнашиваемые в процессе эксплуатации.

**Ключевые слова:** планирование, надежность, параметр, основа, контактные пары, элемент, система, состояние, состояние, безотказность.

Ссылка для цитирования:

Романов И.О. Выбор параметров технического состояния элементов поглощающего аппарата, определяющих его безотказность / И.О. Романов, А.В. Лукьянчук // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 5. – С. 29-39. doi: 10.30987/2782-5957-2024-5-29-39.

Original article

Open Access Article

### SELECTION OF TECHNICAL PARAMETERS OF SHOCK ABSORBING DEVICE ELEMENTS THAT DETERMINE ITS SAFETY

Igor Olegovich Romanov<sup>1✉</sup>, Aleksandr Vladimirovich Lukyanchuk<sup>2</sup>

© Романов И. О., Лукьянчук А. В., 2024

## Abstract

The problems to plan and ensure a given level of reliability of mechanical systems at all stages of their design and operation occupy an important place in the problem of ensuring the quality of machine-building products. With a significant number of scientific methods and approaches to solving theoretical and applied issues of reliability theory, one of the key directions is to determine the reliability indicators of technical systems and their elements, in particular a wide range of products including sliding friction pairs with periodic impacts.

The study of failure origins, from the point of view of physical-mechanical processes occurring in surface layers of elements, under the influence of external factors, allows selecting parameters characterizing the functional state of the pair, and, as a result, its reliability. For example, for sliding friction pairs with periodic impacts, such a parameter is the geometric dimensions of the conjugate elements.

The decrease in the geometric dimensions of conjugate elements, due to wear, characterizes the rate

of change of the initial parameter values to the maximum permissible ones determining the failure, and can be approximated by linear, power, exponential and other dependencies obtained from actual measurements. According to the obtained functional dependencies of parameter changes over operating time, it makes possible to determine the norm for the parameter regulating their pre-failure state, beyond which failure prediction is possible with varying probability, and, as a result, the reliability of the system as a whole.

The use of this method to reliability forecasting through the determination of the pre-failure state of the system can be projected onto technical objects, which performance indicators are geometric parameters that ensure the performance, first of all, of the functions of the elements themselves and the entire technical system, and worn out during operation.

**Keywords:** planning, reliability, parameter, basis, contact pairs, element, system, condition, safety margin.

## Reference for citing:

Romanov IO, Lukyanchuk AV. Selection of technical parameters of shock absorbing device elements that determine its reliability. *Transport Engineering*. 2024;5:29-39. doi: 10.30987/2782-5957-2024-5-29-39.

## Введение

Современное развитие техники характеризуется повышенными требованиями к надежности, безопасной и энергоэффективной эксплуатации технических систем, достижение которых возможно при оптимальном решении теоретических и прикладных вопросов планирования и обеспечения требуемых свойств и характеристик их структурных элементов и сопряжений.

В настоящее время существует значительное разнообразие машин и оборудования, используемых в различных отраслях промышленности, проектируемых для работы в условиях сухого трения с периодическими ударными воздействиями. К примеру, в нефтегазодобывающей промышленности характерным примером таких пар может являться пара "цапфа – подшипник скольжения" в опоре шарошечного долота, узлы пневматических и гидравлических ударников, в двигателях внутреннего сгорания можно выделить еще несколько пар трения скольжения, работающих в условиях периодических

ударных воздействий, например, "клапан – сухарь", "сухарь – тарелка клапана" или "кулачок – толкатель" либо (в зависимости от конструкции двигателя) пара "кулачок – коромысло" и т.д. Характерным примером технической системы для подвижного железнодорожного состава, содержащей до двенадцати пар трения скольжения с периодическими ударными воздействиями, являются фрикционные поглощающие аппараты типа Т1, прогнозирование надежности которых, в первую очередь, связано с обеспечением безопасности движения.

Планирование показателей надежности поглощающих аппаратов и их составляющих деталей основано на решении вопросов оценки работоспособного состояния системы в заданных условиях. В большинстве случаев в основу математических моделей, описывающих распределение силовых усилий поезда при его движении, лежит превышение продольной силы соударения, которая зависит от силовой характеристики поглощающих аппаратов, коэффициента передачи трения, жесткости

корпуса аппарата, хода аппарата и т.п. При этом расчеты ведутся на квазистатическом уровне, т.е. при однократном приложении продольной силы, без учета временного фактора, влияющего на изменение параметров математической модели и указанных ее составляющих.

Внешние воздействия, в которых работают поглощающие аппараты, и как следствие, контактные пары, обуславливают переменные факторы, определяющие сложность прогнозирования комплексных

### **Выбор параметров технического состояния**

Свойство надежности изделия машиностроения характеризует его способность сохранять во времени заданные параметры функционирования и, в конечном, счете обеспечивать соответствующую эффективность его эксплуатации. В соответствии с нормативно-технической документацией [1] надежность технических систем может быть охарактеризована, как только единичными показателями (безотказностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью и долговечностью) или их совокупностью, так и совместно с комплексными показателями. Очевидно, что выбор показателей надежности решающим образом зависит от того, какие требования к технической системе считаются наиболее важными. Задание значительного количества требований на этапе проектирования не всегда являются реализуемыми. В этом случае требуется некоторый достаточный минимум показателей, которым необходимо использовать. В большинстве случаев одними из основных показателей надежности являются вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа  $T$  или интенсивностью отказов %, которые, в первую очередь определяют безотказность изделия, характеризующую ее работоспособным состоянием (рис. 1). Работоспособное состояние системы характеризуется функциями элементов и их наработкой в условиях внешнего воздействия. Реализации функций с учетом отклика системы на внешние воздействия определяют требования к параметрам технического состояния. Выбор норм на параметры обусловлен их измене-

и единичных показателей надежности, одним из которых является безотказность.

В большинстве случаев прогнозирование безотказности базируется на статистической информации, полученной по данным эксплуатации (по количеству отказавших элементов) и теоретических расчетах, однако данный подход не позволяет проводить оценку технического состояния изделия в любой момент времени, тем самым прогнозировать появление отказа системы.

ниями в пределах заданной наработки. Реализация представленного алгоритма, характеризующего оценку предотказного и предельного состояния системы, в работе представлена на примере фрикционных поглощающих аппаратов и их структурных составляющих.

Опыт эксплуатации и математическое моделирование силовых воздействий, возникающих при взаимодействии элементов поглощающих аппаратов, позволяют выявить их целевые функции. При этом необходимо учитывать, что функции элементов пар трения скольжения должны определяться конструктивными особенностями самого соединения, что, в свою очередь, в соответствии с принципом соподчиненности, обуславливается функциями поглощающего аппарата в целом (таблица). Реализация функций технической системы обеспечивается кинематическим взаимодействием элементов, в частности в поглощающем аппарате за счет прилегания плоскостей сопряженных элементов в контактной паре, большая часть энергии сжатия за счет сил трения преобразуется в тепловую энергию. Условия работы элементов пар трения скольжения в поглощающем аппарате определяются их кинематическими особенностями, и характеризуют углы трения на главных поверхностях, углы трения на вспомогательных поверхностях, коэффициенты трения на главных и вспомогательных поверхностях, коэффициенты, учитывающие коэффициент трения от скорости скольжения, а также влияют на силу начальной затяжки.

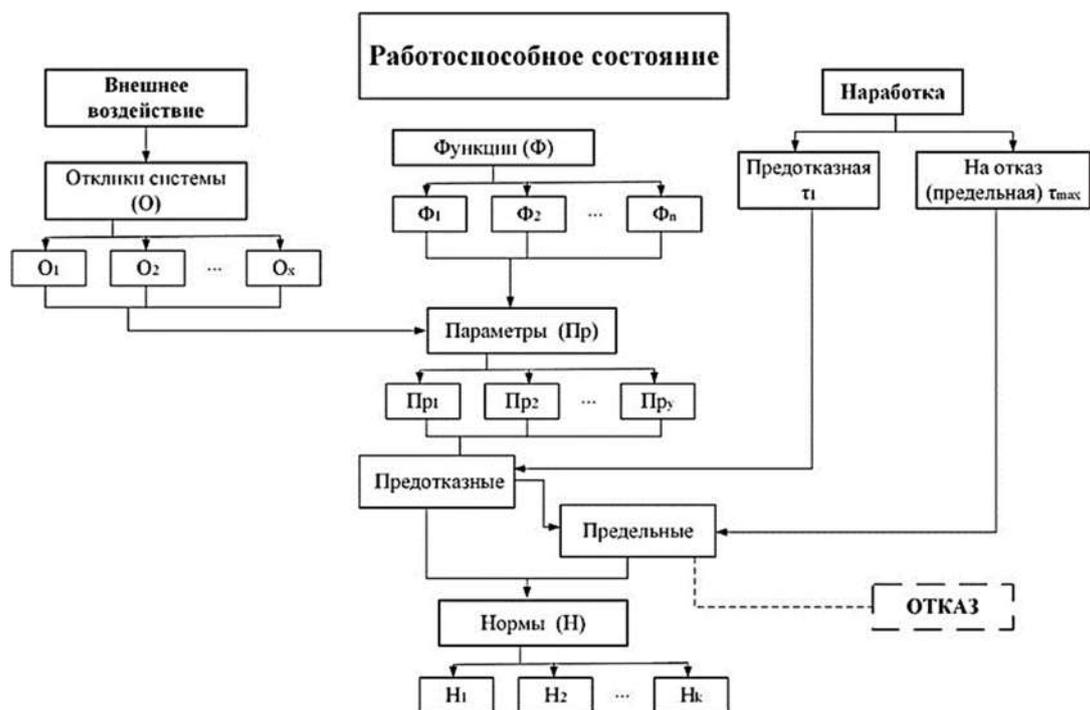


Рис. 1. Формализованная схема работоспособного состояния  
 Fig.1. A formalized scheme of a functional state

Таблица  
 Функции основных элементов фрикционного поглощающего аппарата

Table

Functions of the main elements of the shock absorbing device

Техническая система/элемент	Функции			
Поглощающий аппарат	Амортизация динамической составляющей продольной силы.	Преобразование кинетической энергии ударяющихся масс в другие виды энергии	Передача тягового и тормозного усилия от одной части состава к другой	Уравновешивание статических и квазистатических сил в поезде
Корпус	Создание проходного канала требуемого размера для установки элементов фрикционного узла	Удержание массы элементов поглощающего аппарата	Передача продольных усилий от одного узла состава к другому	Выполнение роли фрикционного узла (поглощение механической энергии)
Нажимной конус		Перемещение сопряженных элементов	Разложение продольного усилия на нормальное и реактивные составляющие силы трения и их передача от одного узла состава к другим	Поглощение механической энергии
Клин		Удержание, фиксация и позиционирование фрикционных элементов	Распределение и передача нормальной и реактивной составляющей силы трения между элементами	Поглощение механической энергии
Подвижная пластина			Создание дополнительной работы сил трения между элементами	Поглощение механической энергии
Неподвижная пластина			Создание работы сил трения	Поглощение механической энергии

Путь трения при линейном перемещении элементов в контактной паре зависит от внешних силовых воздействий и определяет характеристики элементов и отклики системы (в этом случае под откликом системы следует понимать изменения в структурных элементах системы). Высокие удельные давления в момент перемещения элементов относительно друг друга приводят к возникновению точечных связей, обусловленных схватыванием рабочих поверхностей в местах фактического контакта. Причем изменение условий трения на одном из них влечет за собой

изменение сил на других, и, как следствие, изменяется динамика работы пары трения и поглощающего аппарата в целом.

Рассмотрение поверхностей пар трения (рис. 2) и данные, полученные многими исследователями [2-7 и др.] позволяют установить и систематизировать основные виды разрушения. В общей картине изучения сопряженных деталей можно выделить, что поверхности пар трения скольжения с периодическими ударными воздействиями в поглощающем аппарате подвергаются усталостному и пластическому деформированию под высоким давлением.



Рис. 2 Пары трения скольжения фрикционного поглощающего аппарата:  
1 – подвижная пластина; 2 – фрикционный клин; 3 – неподвижная пластина

*Fig.2. Sliding friction pairs of the friction absorbing apparatus:  
1 – movable plate; 2 – friction wedge; 3 – fixed plate*

Изучение рабочих поверхностей позволяет описать виды изнашивания и разрушения элементов указанных пар трения [8].

К примеру, в процессе работы пары трения скольжения с периодическими ударными воздействиями, в поверхностном слое элементов присутствуют многочисленные микротрещины, с разнонаправленными векторами развития. Микроструктура в зоне контакта представляет собой мелкоигольчатый мартенсит. Сред-

нее значение твердости HV 700. С повышением пластичности и уменьшением микротвердости металла в переходной зоне частицы с рабочей поверхности отрываються в результате многократной пластической деформации. При дальнейшем контакте рабочих поверхностей взаимодействует вязкая сердцевина, имеющая твердость HV 270-330. В этом случае микрорельеф поверхности (по [9]) представляет собой сочетание гребешков и лунок, открытых и закрытых, различной формы и

глубины. Следы хрупкого выкрашивания отсутствуют; по контуру отдельных лунок четко выражено пластическое деформирование металла (рис. 3 а).

Сущность данного вида износа можно охарактеризовать зарождением и постепенным развитием усталостных трещин, а также пластическим деформированием поверхностного слоя (рис. 3 б), в следствие

высоких контактных напряжений. По мере разрушения термообработанного поверхностного слоя в работу вступают нецементированные слои сердцевины элемента. С этого момента зазоры между сопряженными элементами пары заметно увеличиваются, так как начинается интенсивная стадия изнашивания.



а)



б)

Рис. 3. Усталостное изнашивание поверхностного слоя подвижной пластины поглощающего аппарата:  
а – пластическая деформация лунки; б – остаточные следы пластического деформирования  
*Fig.3. Fatigue wear of the surface layer of the movable plate of the absorbing apparatus*

Кроме усталостного износа поверхности элементов пар трения скольжения изнашиваются в результате схватывания поверхностей трением. Данный вид изнашивания можно представить следующим образом. На поверхностях контакта под воздействием значительных удельных давлений возникают межатомные соединения. Установлено [10], что схватывание возникает на участках фактического контакта при удельных давлениях, превышающих предел текучести.

Точечные связи весьма кратковременны, так как соприкасающиеся поверхности имеют непрерывное относительное перемещение, что приводит к постоянному процессу разрушения мест схватывания. Разрушение местных точечных связей распространяется в ряде случаев на значительную глубину от поверхности трения, поэтому следы разрушения от такого вза-

имодействия представляют собой грубые прерывающиеся задиры и местные наплывы на поверхностях трения элементов контактной пары (рис. 4).

Характерным признаком каждого вида изнашивания является то, что развитие физико-механических процессов разрушения сопряженных элементов пар трения скольжения при ударе, в первую очередь, связано с дезинтеграцией их поверхностных слоев, в частности с выкрашиванием, пластическим деформированием, циклической и статической усталостью, которая зависит не только от внешних воздействий, но и от площади контактирования.

Изменение условий контактирования функционально связано с периодом эксплуатации и может варьироваться в пределах полного, частичного или локального (точечного) взаимодействия.

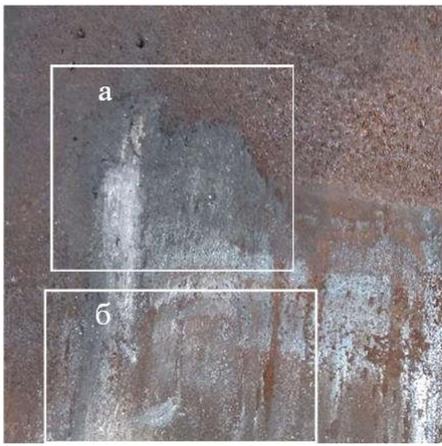


Рис. 4. Контактное изнашивание поверхностного слоя подвижной пластины поглощающего аппарата: а – остаточные следы наплыва, б – осаточные следы задира

*Fig.4. Contact wear of the surface layer of the movable plate of the absorbing apparatus: a – residual traces of influx, b – axial traces of a bully*

Соответственно, в начальный период в паре трения скольжения силовые нагрузки распределяются по всей поверхности. По мере неравномерного разрушения поверхностного слоя, увеличивается зазор, перераспределяются удельные нагрузки, усиливается роль динамических воздействий, преобразуются коэффициенты трения, что существенно отражается на изменении как геометрических размеров элементов, так и характеристиках их взаимодействия (углах трения на главных и вспомогательных поверхностях, коэффициентах трения на главных и вспомогательных поверхностях, а также на силе начальной затяжки [13-15 и др.]), что является причи-

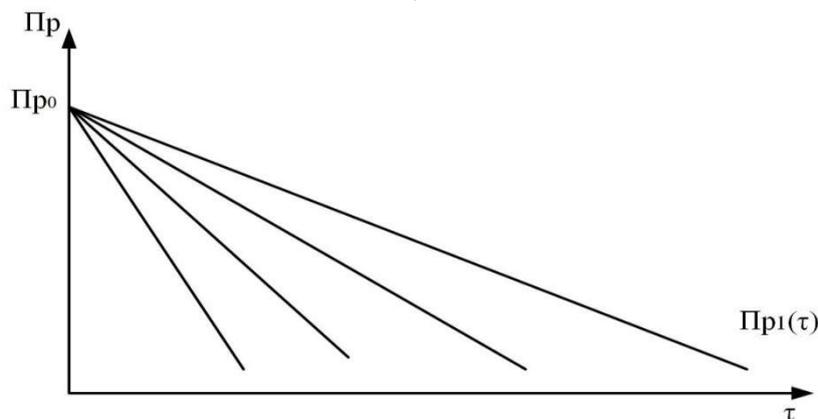


Рис. 5. Закономерность изменения параметров элементов при изнашивании  
*Fig.5. The pattern of changes in the parameters of the elements during wear*

Закономерность изменения параметров, выраженная уравнением (1), означает, что данный процесс определяется началь-

ной заклинивания аппарата и его дальнейшего разрушения.

Снижение геометрических размеров элементов контактной пары ниже предельно допустимого значения не позволяет выполнять заданные функции в полном объеме, т.е. система переходит в неработоспособное состояние. Очевидно, что, с точки зрения физики процессов, приводящих к отказу, параметром, характеризующим безотказность рассматриваемых контактных пар, являются геометрические размеры их структурных элементов.

Уменьшение геометрических размеров ниже предельно допустимого уровня, с последующим отказом системы, определяет необходимость выбора норм на параметр, обуславливающих предотказное состояние элементов.

При изучении изменений параметров до предотказного состояния элементов следует исходить из того, что данный процесс имеет случайный характер, но тем не менее характеризуется определенными закономерностями.

К примеру, простейшее представление о процессе изменения параметров при изнашивании элементов как случайном процессе дает семейство прямых со случайным углом наклона  $\arctg\alpha$  (рис. 5).

Обозначив через  $Пр_1(\tau)$  значение параметра в момент времени  $\tau$ , получим

$$Пр_1(\tau) = tg\alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – случайная величина.

ным состоянием объекта [11]. С течением времени эксплуатации, начальное значение параметра  $Пр_0$  уменьшается по зависимо-

сти  $\text{Pr}(\tau)$ . Эта функция случайна во времени и характеризует скорость изменения начального параметра. Закон изменения параметра от начала эксплуатации до предельного значения может быть аппроксимирован линейной, степенной, экспоненциальной и др. зависимостями.

При математическом анализе кинетики изменения параметров следует исходить из представления, что  $\text{Pr}_1(\tau)$  – интегральная функция скорости изменения параметра  $\xi(\tau)$ . Это означает справедливость равенства 2.

$$\text{Pr}_1(\tau) = \int_0^\tau \xi(\chi) d\chi, \quad (2)$$

где  $\xi(\tau)$  – скорость изменения параметра как случайный процесс, такой, что

$$\xi(\tau) \geq 0 \quad (3)$$

В этом случае, стохастические процессы, удобно рассматривать как процесс с сильным перемешиванием. Тогда

$$E\{\text{Pr}_1(\tau)\} = a\tau; \quad (4)$$

$$D\{\eta(\tau)\} = b\tau \quad (5)$$

т.е. при постоянной средней скорости изменения параметра, вероятно, окажется, что среднее изменение параметра  $E\{\text{Pr}_1(\tau)\}$  и дисперсия  $D\{\text{Pr}_1(\tau)\}$  изменения параметра пропорциональны времени  $\tau$  изменения.

При постоянстве средней скорости  $E\{\xi(\tau)\}$  изменения параметра соотношение (4) является очевидным и не зависит от остальных свойств процесса  $\text{Pr}_1(\tau)$  Однако

для дисперсии, представленной соотношением (5), из рис. 5 следует, что  $D\{\text{Pr}_1(\tau)\} = D\{a\}\tau^2$  и существенно зависит от перемешивания процесса изменения параметра. Важнейшее свойство процесса  $\sqrt{2}$ , обладающего сильным перемешиванием, состоит в том, что распределение случайной величины  $\text{Pr}_1(\tau)$  при больших  $\tau$  является асимптотически нормальным. Данный факт объясняет, что в основном распределение размеров изношенных деталей оказывается нормальным. Однако для уточнения закона распределения уменьшения геометрических размеров элементов следует воспользоваться построением точечной диаграммы и кривой рассеяния (рис.6).

Данные формы графического изображения рассеяния значений параметров элементов пары трения позволяют проводить оценку изменения параметра до предотказного состояния, при этом на график наносятся непосредственные значения, полученные в процессе измерения и испытаний [12].

Основной числовой характеристикой является величина поля рассеяния  $\omega$  (6)

$$\omega = A_{\max} - A_{\min} \quad (6)$$

где  $A$  – значение показателя.

Тогда графически вышесказанное можно выразить следующим образом, рис. 7.

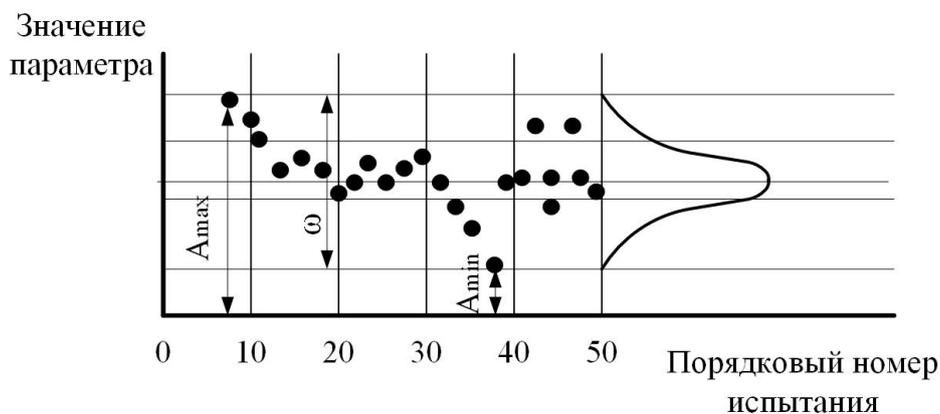


Рис. 6. Точечная диаграмма рассеяния значение параметра

Fig.6. Scatter plot parameter value

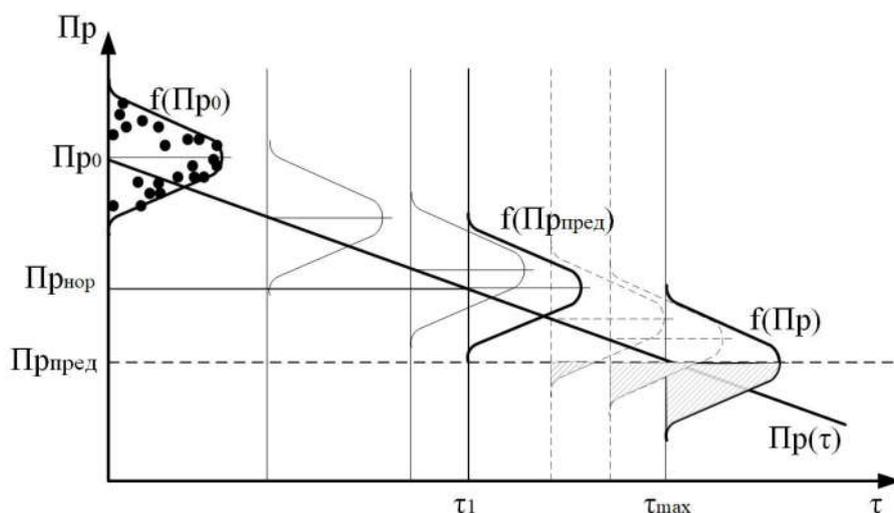


Рис.7. Кинетика изменения параметров пары трения скольжения с периодическими ударными воздействиями  
*Fig.7. Kinetics of changing the parameters of a sliding friction pair with periodic impacts*

По функциональной зависимости становится возможным определение  $Pr_{пред}$ , соответствующего предельному значению параметра, при достижении которого в момент времени  $\tau_{max}$  наступает отказ системы, также, при достижении значения  $Pr_{нор}$  (нормированное значение параметра) время  $\tau_1$  соответствует работе на предотказное состояние. В интервале  $\tau_1 - \tau_{max}$  возможно прогнозировать появление отказов с различной вероятностью, как вероятность выхода за установ-

ленную норму параметра, выбор которой следует проводить по результатам испытаний или эксплуатации с учетом угла наклона кривой  $Pr(\tau)$ .

Получение фактических функциональных зависимостей изменения начального значения параметра во времени, характеризующую скорость изменения параметра, позволяет прогнозировать предотказное состояние элементов, тем самым исключая появление отказа системы.

### Заключение

Получение функциональной зависимости изменения параметров технического состояния элементов контактной пары при оценке работоспособности технической системы до их предельно допустимого значения от времени позволит отслеживать изменение кинематического взаимодействия соприкасающихся поверхностей. Оценить влияние изменений в каждый момент времени, построить зависимости "размер элементов – коэффициенты трения", "размер элемента – сила затяжки" и других характеристик контактной пары, учитываемых в расчетах и зависящих от геометрических размеров элементов, а также и использовать полученные данные в математическом моделировании поглощающих аппаратов.

Кроме того, алгоритм выбора параметров технического состояния (на примере фрикционного поглощающего аппарата), характеризующих предотказное состояние элементов, и оценка кинетики их изменения являются первым этапом прогнозирования надежности пар трения скольжения с периодическими ударными воздействиями, широко применяемых в различных отраслях машиностроения. Необходимо отметить, что изменение параметров технического состояния контактной пары вносит изменения в кинематическую схему взаимодействия ее элементов и может иметь различные функциональные зависимости, характеризующие как снижение параметров во времени, так и их увеличение (например, в случае если в качестве параметра выбран не геометрический

размер элемента, а зазор между элементами).

Вторым, не менее важным этапом, является формулирование на основе полученных функциональных зависимостей

требований к материалам элементов рассматриваемых пар с целью обеспечения задаваемого потребителем уровня надежности технической системы, определяемого возрастающими нагрузками.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 27.003-2016 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности, Москва Стандартинформ, 2018
2. Марков, А.М. Методика исследования характеристик пары трения фрикционного узла поглощающего аппарата / А.М. Марков, А.В. Габец, А.В. Иванов и др. // Актуальные проблемы в машиностроении. Том 5. № 3-4. 2018, С. 137-143.
3. Никольский, Л.И. О работе фрикционных материалов в амортизаторе удара / Л.И. Никольский, И.В. Селинов, Б.Г. Кеглин // "Вестник машиностроения", 1963, № 10.
4. Иньшаков, Н.Н. Изменения металла в поверхностных слоях при сухом трении и влияние их на износостойкость фрикционных аппаратов. Сб. трудов "Качество поверхности деталей машин" / Н.Н. Иньшаков, Е.Ф. Комолова. М., АН СССР, 1961.
5. Иньшаков, Н.Н. Повышение износостойкости и служебных характеристик фрикционных аппаратов автосцепки. Труды третьей конференции по трению и износу в машинах / Н.Н. Иньшаков, В.Г. Голованов. Т. 6, 1960.
6. Дычко, А. А Исследование влияния низких температур на работу автосцепки. Сб. трудов ТЭМИИТа. Т. XXVIII. Изд-во Томского университета, 1959.
7. Чертовских, Е. О. Разработка металлокерамического композиционного материала для фрикционного узла поглощающего аппарата железнодорожного вагона / Е. О. Чертовских, А. В. Габец, А. М. Марков и др. // Инженерный вестник Дона, №1 (2018), С. 34-42.

8. Боуден, Ф.П. Трение и смазка твердых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейлор. М. Машиностроение. 1968, 543 с.
9. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных), ГосНИИВ – ВНИИЖТ, Москва, 1996 г.
10. Семенов, А.П. Исследование схватывания металлов при совместном пластическом деформировании., М., Изд-во АН СССР, 1953, 120 с.
11. Кордонский, Х. Б. Форсирование испытания надежности машин – "Стандартизация", 1964, № 7.
12. Протасов, В. Н., Романов И. О., Шахов М. В. Планирование и обеспечение качества и эффективности технологических процессов в машиностроении. Под общ. ред. В.Н. Протасова: Монография. Москва Вологда «Инфра-Инженерия», 2023.
13. Болдырев, А.П. Методика оценки параметрической надежности поглощающих аппаратов автосцепки с использованием статистического моделирования и теории экстремальных значений / А. П. Болдырев, П.Д. Жиров, А.П. Шлющенко // Вестник РГУПС, №1 (2012), С. 46 – 53.
14. Никольский, Л.Н, Кеглин Б.Г. Амортизаторы удара подвижного состава. – М.: Машиностроение, 1986, – 144 с., ил.
15. Азовский, А.П. Основы конструирования и экспертизы технических решений: Учебное пособие для вузов ж.д транспорта / А.П. Азовский, Е.В. Александров, В.В, Кобищанов и др. М.: Маршрут, 2005. 490 с.

## REFERENCES

1. GOST 27.003-2016 Reliability in Engineering. Composition and general rules for setting reliability requirements. Moscow: Standartinform; 2018.
2. Markov AM, Gabets AV, Ivanov AV. Methodology for studying the characteristics of the friction pair of the shock absorbing device. Actual Problems in Machine Building. 2018;5(3-4):137-143.
3. Nikolsky LI, Selinov IV, Keglin BG. On the work of friction materials in a shock absorber. Vestnik Mashinostroeniya. 1963;10.
4. Inshakov NN, Komolova EF. Metal changes in surface layers under dry friction and their effect on the wear resistance of friction devices. Collection of papers: Surface Quality of Machine Parts. Moscow: Academy of Sciences of the USSR; 1961.

5. Inshakov NN, Golovanov VG. Improvement of wear resistance and service characteristics of friction coupling devices. Proceedings of the Third Conference on Friction and Wear in Machines. 1960;6.
6. Dychko AA. Study of the effect of low temperatures on the operation of the automatic coupling. Collection of works of TEMIIT. Publishing House of Tomsk University; 1959.
7. Chertovskikh EO, Gabets AV, Markov AM. Development of a metal-ceramic composite material for the friction unit of the shock absorbing device of a railway car. Engineering Journal of Don. 2018;1:34-42.
8. Bowden FP, Taylor M. Friction and lubrication of solids. Moscow: Mashinostroenie; 1968.

9. Standards for the calculation and design of railcars with the gauge of 1520 mm (non-self-propelled). Moscow: GosNIIV – VNIIZHT; 1996.
10. Semenov AP. Study of metal setting under joint plastic deformation. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1953.
11. Kordonsky Kh.B. Forcing machine reliability tests. Moscow: Standardizatsiya; 1964.
12. Protasov VN, Romanov IO, Shakhov MV. Planning and ensuring the quality and efficiency of technological processes in mechanical engineering: monograph. Moscow-Vologda: Infra-Ingenieriya; 2023.

13. Boldyrev AP, Zhiron PD, Shlyushenkov AP. Methodology for evaluating the parametric reliability of self-coupling absorbing devices using statistical modeling and theory of extreme values Vestnik RGUPS. 2012;1:46-53.
14. Nikolsky LN, Keglin BG. Shock absorbers of rolling stock. Moscow: Mashinostroenie; 1986.
15. Azovsky AP, Aleksandrov EV, Kobishchanov VV. Fundamentals of design and expertise of technical solutions: textbook for universities of railway transport. Moscow: Marshrut; 2005.

#### **Информация об авторах:**

**Романов Игорь Олегович** – кандидат технических наук, доцент кафедры "Транспортно-технологические комплексы" Дальневосточного государственного университета путей сообщения, Author-ID-РИНЦ 641517, тел. .89249241303.

**Romanov Igor Olegovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Complexes at Far Eastern State Transport University; Author-ID-RSCI 641517; phone: 89249241303.

**Лукьянчук Александр Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры "Транспортно-технологические комплексы" Дальневосточного государственного университета путей сообщения, тел. .89242022176.

**Lukyanchuk Aleksandr Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Complexes of Far Eastern State Transport University; phone: 89242022176.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 17.03.2024; одобрена после рецензирования 23.03.2024; принята к публикации 26.04.2024. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 17.03.2024; approved after review on 23.03.2024; accepted for publication on 26.04.2024. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**