



# Анализ надежности буксы: построение дерева событий



Евгений КРУГЛИКОВ

Evgeny P. KRUGLIKOV

**Для планирования мер, связанных с повышением безопасности, надежности и эксплуатационной готовности вагонов, нужно располагать моделью, которая могла бы быть использована при расчете параметров системы ТОР (технического обслуживания и ремонта). Свою роль в такой модели способен выполнять специальный показатель надежности, характеризующий вероятность безотказной работы. В представленной статье дается анализ причин отказов буксовых узлов грузовых вагонов, показаны алгоритм построения дерева предшествующих им событий, переход от древовидной структуры описания событий к матричной. С помощью метода путей и сечений получены математически выраженные обоснования для определения безотказной работы буксового узла.**

*Ключевые слова:* железная дорога, грузовой вагон, букса, отказ, надежность, дерево событий, метод путей и сечений.

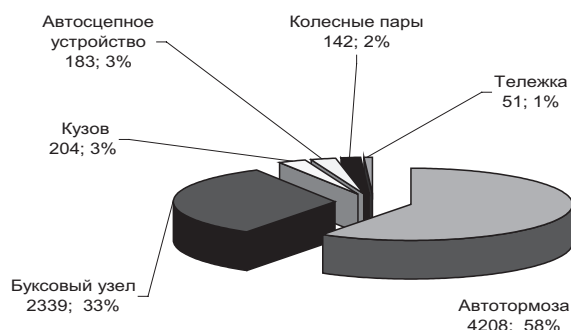
*Кругликов Евгений Павлович — аспирант (комплексное отделение «Вагоны и вагонное хозяйство») ОАО «ВНИИЖТ», Москва, Россия.*

**Ч**тобы добиться эффективной организации технического обслуживания и ремонта (ТОР) вагонов, требуется модель надежности, которая могла бы помочь обосновать параметры системы и оценить вероятность безотказной работы. Однако получение такой модели является непростой технической задачей, поскольку буксовый узел грузового вагона отличается наличием жестко зависимых друг от друга элементов. Необходимо идентифицировать их связи, причем в системе двух типов: элемент-элемент и элемент-система. Метод дерева событий в сочетании с методом минимальных сечений позволяет решить поставленную задачу.

## НОРМЫ, ДОПУСКИ, ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ

Согласно статистическим данным среди всех отказов грузовых вагонов, требующих внепланового (аварийного) текущего отцепочного ремонта, 33% приходится на буксовые узлы (рис. 1). Основными причинами при этом становятся (рис. 2):

- Ослабление торцевого крепления — 22%;
- Дефекты подшипников (раковины, шелушение, надкрышки типа «елочка») — 18%;



**Рис. 1. Распределение отказов по элементам конструкции вагона.**

**Pic. 1. Distribution of failures by cars' structural elements.**

### Основные причины отказов буксовых узлов



**Рис. 2. Распределение неисправностей буксовых узлов по причинам.**

**Pic. 2. Axle equipment failures according to causes**

- Повреждение резиновой прокладки – 18%;
- Задиры лабиринтных колец – 18%
- Неправильный подбор роликов по длине и диаметру – 8%;
- Дефекты смазки (обводнение, загрязнение) – 4%;
- Излом упорного кольца – 4%
- Неправильный подбор подшипников по радиальному зазору – 4%;
- Трещина полиамидного сепаратора – 4%.

Из всех существующих конструкций буксовых узлов будем рассматривать вариант с роликовыми подшипниками.

Функциями буксового узла являются передача вертикальной и поперечной нагрузки от рамы вагона или тележки на шейку оси, преобразование за счет использо-

вания подшипников вращательного движения оси колесной пары в поступательное движение боковины.

Под *надежностью объекта* понимается его способность сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих готовность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

Надежность выступает комплексным свойством, которое включает в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

Под отказом объекта понимают случайное событие, которое заключается в переходе объекта из работоспособного состояния в неработоспособное.



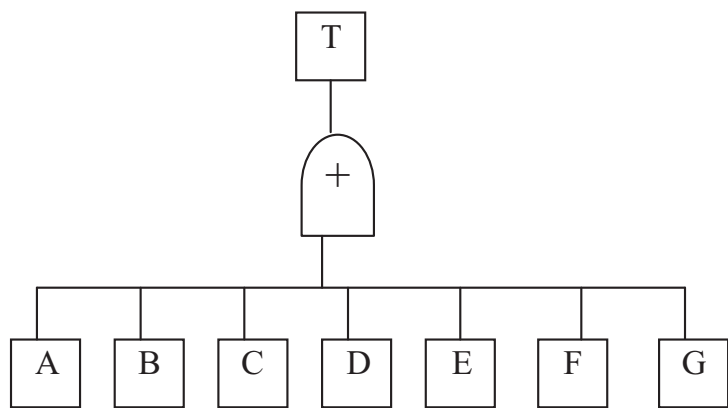


84

Таблица 1/Table 1

Параметры элементов буксы  
Parameters of the elements of the box

| Наименование измерений и норм/<br>Description of measurements and norms                                                                                                                        | Допуски/Allowances                     |                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                | при изготовлении/ during manufacturing | при ремонте / during repairs               |
| Корпус буксы / Body of the box                                                                                                                                                                 |                                        |                                            |
| Диаметр внутренней цилиндрической части буксы/<br>diameter of internal cylindrical part, mm                                                                                                    | 250 <sup>+0,1</sup> <sub>+0,015</sub>  | 250 <sup>+0,2</sup> <sub>+0,015</sub>      |
| Овальность внутренней цилиндрической части / out-of-roundness of internal cylindrical part, mm                                                                                                 | не более/ not more than 0,024          | не более / not more than 0,2               |
| Конусность внутренней цилиндрической части / conicity of internal cylindrical part, mm                                                                                                         | не более/ not more than 0,024          | не более / not more than 0,1               |
| На посадочной внутренней поверхности в верхней части: продольные задиры риски / lengthwise scuffing of the scratch on the internal top part of mounting surface                                | не допускаются / not allowable         | глубина не более 1 / depth not more than 1 |
| Заусенцы, забоины и другие дефекты на лабиринтной части / burrs, dents, other defects on the labyrinth part                                                                                    | не допускаются / not allowable         | не допускаются / not allowable             |
| Коррозия / corrosion                                                                                                                                                                           | не допускаются / not allowable         | не допускаются / not allowable             |
| Подшипники / bearing                                                                                                                                                                           |                                        |                                            |
| Радиальный зазор, с которым подшипники допускаются в эксплуатацию (при горячей посадке) / radial clearance when bearing can be admitted for exploitation (shrinkage fit), mm                   | 0,09–0,145                             | 0,09–0,250                                 |
| Дефекты деталей подшипника (шелушение; раковины; коррозия; трещины; заусенцы сепараторов) / defaults of the bearing's parts (flaking, pockets, corrosion, cracks, burrs of cages or retainers) | не допускаются / not allowable         | не допускаются / not allowable             |
| Лабиринтное кольцо / labyrinth packing ring                                                                                                                                                    |                                        |                                            |
| Трещины, вмятины, забоины, заусенцы на посадочных поверхностях и в лабиринте / cracks, compression marks, dents, burrs on mounting surfaces and in the labyrinth                               | не допускаются / not allowable         | не допускаются / not allowable             |
| Овальность отверстия/ out-of-roundness of the aperture, mm                                                                                                                                     | не более / not more than 0,06          | не более / not more than 0,1               |
| Биение лабиринтных проточек относительно посадочного диаметра d / jumping of labyrinth turns regarding mounting diameter d, mm                                                                 | не допускаются / not allowable         | не более / not more than 0,3               |
| Торцовая гайка / cup nut                                                                                                                                                                       |                                        |                                            |
| Заусенцы / burrs                                                                                                                                                                               | не допускаются / not allowable         | не допускаются / not allowable             |
| Неперпендикулярность привалочной плоскости к оси резьбы гайки / misalignment of halt plain face to the axis of nut thread                                                                      | не более / not more than 0,2 мм        | не более / not more than 0,3 мм            |
| Стопорная планка / locking plate                                                                                                                                                               |                                        |                                            |
| Трещины, заусенцы и другие дефекты / cracks, burrs, other defaults                                                                                                                             | не допускаются/ not allowable          | не допускаются / not allowable             |
| Резиновая прокладка / rubber packing                                                                                                                                                           |                                        |                                            |
| Трещины, заусенцы и другие дефекты / cracks, burrs, other defaults                                                                                                                             | не допускаются / not allowable         | не допускаются / not allowable             |
| Болты / bolts                                                                                                                                                                                  |                                        |                                            |
| Трещины, заусенцы и другие дефекты / cracks, burrs, other defaults                                                                                                                             | не допускаются / not allowable         | не допускаются / not allowable             |
| Пружинные шайбы / spring washers                                                                                                                                                               |                                        |                                            |
| Трещины, заусенцы, деформация и другие дефекты / cracks, burrs, deformation, other defaults                                                                                                    | не допускаются / not allowable         | не допускаются / not allowable             |
| Крепительная крышка / cleat cover                                                                                                                                                              |                                        |                                            |
| Трещины, заусенцы, деформация и другие дефекты / cracks, burrs, deformation, other defaults                                                                                                    | не допускаются / not allowable         | не допускаются / not allowable             |



**Рис.3. Разложение вершинного события:**  
 событие А – заклинивание роликов; событие В – перекос роликов; событие С – несоответствие смазки требованиям НТД; событие D – ослабление торцевого крепления; событие E – образование дефектов на поверхности катания колеса (неравномерный прокат, ползун, навар, вертикальный подрез гребня); событие F – неисправность тележки; событие G – повышение нагрузки на буксу.  
*Pic. 3. Top event dissolution: event A – rollers jamming; event B – roller skew; event C – lubricants incompliance with requirements of technical documentation; event D – weakening of the mechanical fastening; event E – the formation of defects on the surface of wheel roll (uneven rolling, slide, fat, vertical flange worn sharp); event F – failure of cart; event G – axle box load increase.*

$$\begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \\ G \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1,2,3,4 \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \\ G \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1,2,3,4 \\ 5,6,7,8 \\ C \\ D \\ E \\ F \\ G \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1,2,3,4 \\ 5,6,7,8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ D \\ E \\ F \\ G \end{pmatrix} \rightarrow \dots \rightarrow \begin{pmatrix} 1,2,3,4 \\ 5,6,7,8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \\ 20 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ 36 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Исправное состояние объекта означает при этом его соответствие всем требованиям нормативно-технической и(или) конструкторской (проектной) документации. В таблице 1 они приведены по отношению к элементам буксы [1].

Обнаружение неисправностей и восстановление работоспособного буксового узла осуществляются при техниче-

ском обслуживании и ремонте вагонов. На ПТО при обнаружении видимых неисправностей по нагреву (выброс смазки на диск колеса, наличие искр, характерный звук) определяется наличие внутренних дефектов деталей или нарушение смазочного режима в ходе ремонта в депо и на вагоноремонтных заводах присутствие внутренних дефек-



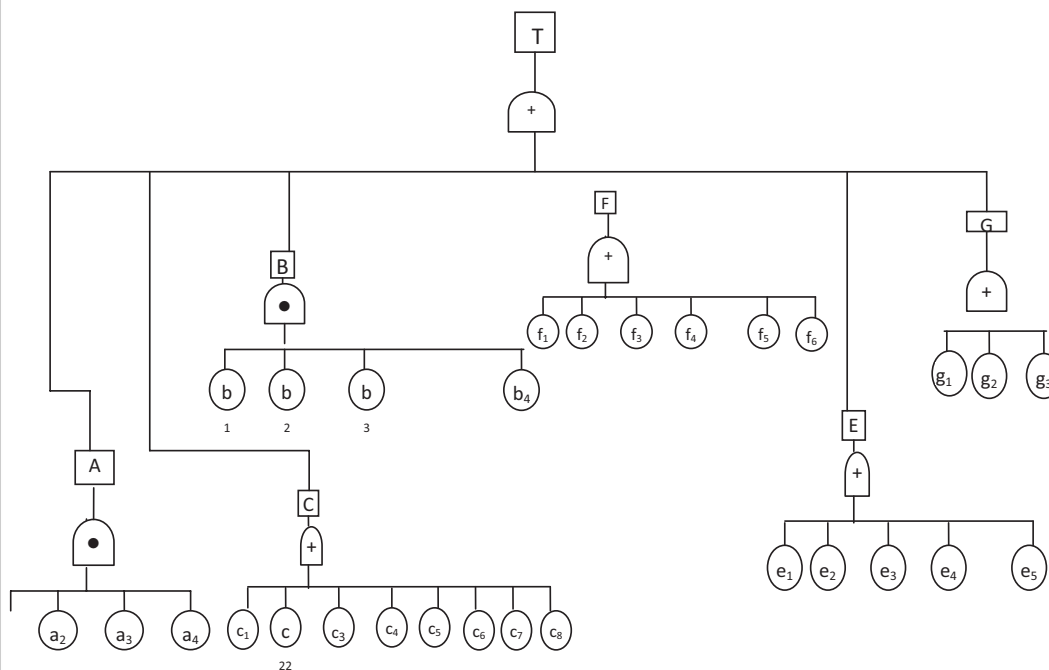


Рис. 4. Дерево событий:

$a_1$  – значение радиального зазора превышает установленное НТД;  $a_2$  – значение осевого зазора меньше установленного НТД;  $a_3$  – значение длины роликов подшипника превышает установленное НТД;  $a_4$  – значение диаметра роликов в подшипнике превышает установленное НТД;  $b_1$  – значение радиального зазора меньше установленного НТД;  $b_2$  – значение осевого зазора больше установленного НТД;  $b_3$  – значение длины роликов подшипника меньше установленного НТД;  $b_4$  – значение диаметра роликов в подшипнике меньше установленного НТД;  $c_1$  – обводнение смазки;  $c_2$  – недостаток смазки;  $c_3$  – избыток смазки;  $c_4$  – загрязнение смазки;  $c_5$  – неоднородность смазки;  $c_6$  – разрыв уплотнительной прокладки;  $c_7$  – разрыв уплотнительного кольца;  $c_8$  – образование дефектов крепительной крышки (деформация, трещины и т. п.);  $d_1$  – износ резьбы М12 при контакте «болт-шейка»;  $d_2$  – износ резьбы М20 при контакте «болт-шейка»;  $d_3$  – износ резьбы М110 при контакте «корончатая гайка-шейка»;  $d_4$  – трещина шайбы;  $d_5$  – трещина гайки;  $d_6$  – трещина стопорной планки;  $e_1$  – неисправность воздухораспределителя;  $e_2$  – неисправность тормозного цилиндра;  $e_3$  – неисправность авторежима;  $e_4$  – неисправность авторегулятора;  $e_5$  – регулировка тормозной рычажной передачи не соответствует требованиям НТД;  $f_1$  – забегание боковых рам относительно друг друга;  $f_2$  – завышение фрикционного клина;  $f_3$  – занижение фрикционного клина;  $f_4$  – неправильный подбор пружин по высоте;  $f_5$  – глубина подпятника не соответствует требованиям НТД;  $f_6$  – зазор между направляющими корпуса буксы и челюстью боковой рамы не соответствует требованиям НТД;  $g_1$  – износ опорной поверхности корпуса буксы;  $g_2$  – повышение загрузки вагона;  $g_3$  – неравномерная нагрузка вагона.

Рис. 4. Event tree

$a_1$  – the radial clearance exceeds technical requirements;  $a_2$  – the axial clearance is smaller than technical requirements;  $a_3$  – the length of bearing rollers exceeds technical requirements;  $a_4$  – the diameter of the bearing rollers exceeds technical requirements;  $b_1$  – the radial clearance is smaller than technical requirements;  $b_2$  – the axial clearance is more than technical requirements;  $b_3$  – the length of the bearing rollers is smaller than technical requirements;  $b_4$  – the rollers diameter in the bearing is smaller than technical requirements;  $c_1$  – watering of lubricants;  $c_2$  – lack of lubricants;  $c_3$  – excess of lubricants;  $c_4$  – lubricants pollution;  $c_5$  – heterogeneity of lubricants;  $c_6$  – breaking of sealing;  $c_7$  – breaking of the seal ring;  $c_8$  – main cover defect formation (deformation, cracks, etc.);  $d_1$  – wear of M12 screw in contact «bolt – neck»;  $d_2$  – wear of M20 screw in contact «bolt – neck»;  $d_3$  – wear of M110 screw in contact «castle nut – neck»;  $d_4$  – crack in washers;  $d_5$  – crack in nuts;  $d_6$  – crack in the locking plate;  $e_1$  – air distributor fault;  $e_2$  – breaking service fault;  $e_3$  – automatic performance fault;  $e_4$  – automatic regulator fault;  $e_5$  – adjustment of brake rigging does not meet the technical documentation requirements;  $f_1$  – loosening of side frames;  $f_2$  – overstatement of the friction wedge;  $f_3$  – understatement of the friction wedge;  $f_4$  – wrong selection of springs;  $f_5$  – the depth of the axle bearing does not meet technical documentation requirements;  $f_6$  – the gap between the slideways of axle box body and horn plate of side frame does not meet the technical documentation requirements;  $g_1$  – wear of bearing surface of axle box body;  $g_2$  – increase in car load;  $g_3$  – uneven car load.

тов фиксируется при демонтаже буксового узла [2].

Основной проблемой для буксовых узлов считается то, что большинство элементов находится внутри корпуса, из-за чего имеют нулевую контролепригодность во время ПТО и доступны для диагностирования лишь в условиях депо. Отказы

подшипников приводят к быстрому отвалу шейки оси и сходу вагона с рельсов.

## УПРОЩЕННАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ

При упрощенной оценке надежности букса рассматривается как система, состоящая из двадцати одного последователь-

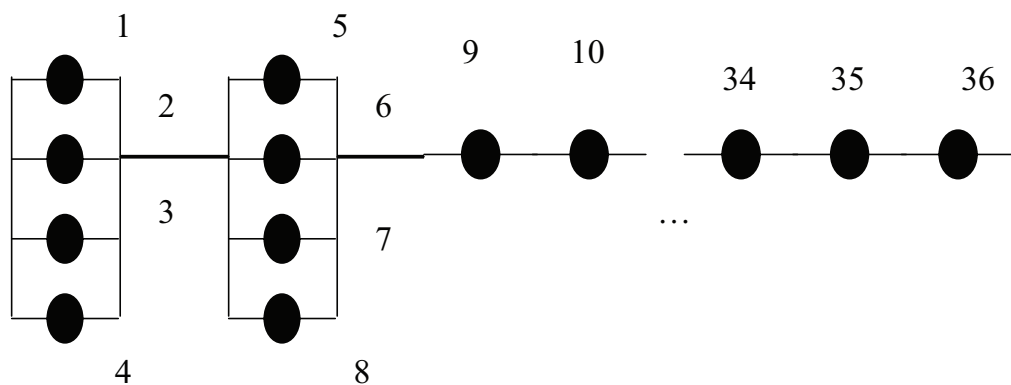


Рис.5. Последовательная структурная схема буксового узла.

Pic. 5. Sequential structural scheme of axle equipment

но-параллельно соединенного элемента: корпуса буксы, лабиринтного кольца, подшипников заднего, переднего, крепежной крышки, шести болтов, шести шайб, смотровой крышки, резиновой прокладки, торцевой гайки, стопорной планки.

Однако подобное представление допустимо лишь для систем с расчленяемой структурой, тогда как известно, что вагонные конструкции, в том числе буксовые узлы, относятся к системам с комбинированной структурой, то есть в их составе существуют подсистемы и со связанной структурой.

Предположим, надежность всех элементов обеспечена. Обычно считают, что система в этом случае обязательно будет работоспособна. Тем не менее это верно только для полностью расчленяемых структур. Как правило, безотказная работа элементов системы является лишь необходимым, но не достаточным условием. Для систем с жестко связанной структурой даже незначительные вариации свойств отдельных элементов ощутимо сказываются на их выходных параметрах. Малые изменения в пределах нормативных параметров элементов могут дать такое их сочетание, которое неблагоприятно отразится на работоспособности системы в целом.

Для выполнения более глубокого анализа структуры реальной технической системы используют метод дерева событий.

Рассмотрим принцип построения дерева событий при описании отказов буксы

[3], чтобы показать в явном виде слабые места системы, а вместе с тем и средства обоснования принимаемых решений, исследования компромиссных соотношений.

В качестве вершинного события  $T$  возьмем момент перехода движения роликов из режима трения качения в режим трения скольжения, сопровождаемый нагревом, сдвигом буксы, характерным звуком, запахом выгоревшей смазки, образованием следов нагрева (надиры типа «елочка», усталостные и коррозионные раковины), выбросом искр, смазки на обод колеса и т. п.).

Проведем разложение вершинного события (рис.3):

Событием  $T$  непосредственно управляет оператор «ИЛИ», схема совпадает с операцией  $\cup$ . При последующем разложении событиями  $A$  и  $B$  — оператор «И», схема совпадает с операцией  $\cap$  [3]. Аналогично рассматривая каждое из событий  $A-G$ , получим схему, приведенную на рис.4.

Список неразлагаемых (элементарных) событий имеет матричную структуру. Вершинными и промежуточными событиями управляет оператор «ИЛИ»; отобразим их в матрице в виде столбцов, промежуточные события, управляемые оператором «И», отобразим в матрице в виде строк, пронумеровав элементарные события ветвей промежуточных событий (1).

Получаем матрицу с 36 строками, каждая из которых есть минимальное сечение. Тогда сможем представить дерево







в виде последовательной структуры (рис.5):

Опираясь на метод путей и сечений, получаем выражение для определения безотказной работы буксового узла в наугад взятый момент времени [3]:

$$h(p) = \prod_{i=1}^n p_i = \\ [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_3)(1 - p_4)] \\ (1 - (1 - p_5)(1 - p_6)) \\ (1 - p_7(1 - p_{8...})) p_9 p_{10} p_{11...} p_{34} p_{35} p_{36}.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показан метод моделирования надежности (построения дерева событий), позволяющий определить характер отказов буксового узла грузового вагона — их независимость и одновременная взаимосвязанность.

Этот способ реализует дедуктивный метод (причина — следствие), что наделяет его самыми серьезными возможностями при поиске корневых причин событий для статичных систем, поскольку дает наглядную и подробную схему взаимосвязей элементов конструкций и событий, влияющих на их надежность.

Рассмотренный алгоритм количественной оценки надежности буксового узла является доступным средством изучения важнейшей проблемы — количественного и качественного анализа системы. Выведенное соотношение для определения безотказной работы буксового узла позволяет увязать факторы ее влияния на показатели качества эксплуатации вагона. Продолжение исследований предполагает оптимизировать межремонтные пробеги в пределах определенного цикла; уточнить потребности в ремонте в течение интересующего срока с учетом критериев безопасности, которые зависят, в частности, от величины пробега между глубокими диагностиками

## ЛИТЕРАТУРА

1. Инструктивные указания по эксплуатации и ремонту вагонных букс с роликовыми подшипниками. — М.: МПС РФ, 2001. — 110 с.
2. Устич П. А., Хаба И. И., Ивашов В. А. и др. Вагонное хозяйство: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Под ред. П. А. Устича — М.: Маршрут, 2003. — 560 с.
3. Устич П. А., Карпычев В. А., Овечников М. Н. Надежность рельсового нетягового подвижного состава. — М.: УМЦ МПС РФ, 2004. — 416 с.

## RELIABILITY ANALYSIS OF THE JOURNAL-BOX: EVENT TREE CONSTRUCTION

**Kruglikov, Evgeny P.** — Ph. D. student (complex department «Cars and cars facilities») JSC VNIIZhT (Russian research institute of railways), Moscow, Russia.

## ABSTRACT

To work out measures related to improving safety, reliability and operating availability of cars, it is necessary to have a model that could be used in calculating the parameters of the MaR system (maintenance and repair). Special reliability index characterizing the probability of failure-free operation will be able to play its role in such a model. In the present article the author analyzes the causes of failures of freight cars axle equipment, shows an algorithm for constructing the tree of events that precede them, the transition from the tree-type structure of events description to the matrix one. Mathematically expressed rationale for determining failure-free operation of axle equipment was obtained with the help of paths and cross-sections method.

## ENGLISH SUMMARY

**Background and methods.** To achieve effective organization of maintenance and repair (MaR) of cars, reliability model, which could prove the system parameters and estimate the probability of failure-free operation, is required. However, obtaining such a model is a technical challenge, as the freight car axle equipment has rigidly

interdependent elements. It is necessary to identify their connections, wherein in the system of two types: element-element and element-system. Event tree method in combination with the method of minimum cross-sections allows solving the problem.

**Objective.** The author's goal is to offer a model that can be used for calculating of parameters of maintenance and repair system concerning axle-related failures of rail cars.

**Results.** The author gives the data on causes of freight cars failures. 33% of failures occur in axle equipment (Pic. 1). The main reasons are: (Pic. 2):

- weakening of the mechanical fastening — 22%;
- defects of bearings — 18%;
- damage to the rubber cushion — 18%;
- scoring of labyrinth rings — 18%;
- wrong rollers in length and diameter — 8%;
- defects of lubricants (watering, polluting) — 4%;
- breaking of spacing ring — 4%;
- wrong selection of bearings with radial clearance — 4%;
- crack in nylon separator — 4%.

In the article the author focuses on the axle equipment with roller bearings.