

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ В КОНСТРУКЦИИ РЕЛЬСОВЫХ ЭКИПАЖЕЙ

В статті наводиться обґрунтування існування причинно-слідчого зв'язку між різними елементами рейкових екіпажів. Наводиться ймовірна оцінка взаємного зв'язку між технічним станом окремих елементів.

В статье приводится обоснование существования причинно-следственной связи между различными элементами рельсовых экипажей. Приводится вероятностная оценка взаимной связи между техническим состоянием отдельных элементов.

In the article the substantiation of existence of cause-consequence relation between different elements of railway vehicles is presented. The probability assessment of mutual relation between technical conditions of separate elements is also presented.

Железнодорожные рельсовые экипажи, как известно, представляют собой сложные механические системы, которые состоят из множества узлов и деталей, соединенных различными видами связей. При этом связи носят характер упругого, жесткого или контактного соединения [1, 2]. Однако существует еще одна связь между элементами рельсового экипажа и его функциональными характеристиками. Эта связь имеет причинно-следственный характер. Проследим возможную последовательность влияния изменения состояния отдельных элементов на состояние других элементов и рельсового экипажа в целом.

Например, такая неприметная деталь, как шплинт валика тормозной рычажной передачи препятствует выпадению валика и соответственно предотвращает разъединение рычагов, а, следовательно, способствует нормальной работе тормозной системы. Двухсторонний излом шплинта или неправильная его установка в конечном итоге могут привести к отказу работы тормозной рычажной передачи и снижению или полной потере тормозной эффективности рельсового экипажа. При этом сложившаяся аварийная ситуация имеет свою степень вероятности. И пусть порядок ее мизерно мал, при определенных обстоятельствах он может быть весьма существенен. Опять-таки это зависит от функционального состояния других элементов.

Возьмем другой пример – колесная пара пассажирского вагона, которая непосредственно передает нагрузку от экипажа на рельсошпальную решетку. При возникновении ползуна на поверхность катания колеса следует возрастание динамической нагрузки как на вагон и, естественно, это в первую очередь отрицательно сказывается на показателях комфорта-

сти пассажиров, при этом способствуя чрезмерному нагружению всех элементов вагона и пути. А при определенных величинах ползунов и их расположении на колесах (на одной тележке, на двух, с одной стороны вагона, по диагонали) возможна ситуация, угрожающая безопасности движения. И, опять-таки, подобные отказы имеют свою степень вероятности.

Далее приведем еще несколько примеров теоретически возможной причинно-следственной связи между механическими элементами рельсовых экипажей и их отказами. Изобразим это в виде структурной схемы (рис. 1).

Таким образом, отказ или отклонение от номинальных функциональных характеристик одного или нескольких элементов рельсового экипажа закономерно отражается на функциональных характеристиках других элементов, что может повлечь за собой изменение динамических характеристик экипажа в целом и привести к снижению показателей безопасности движения и снижению показателей надежности.

Далее рассмотрим математическое описание взаимосвязи технических и функциональных параметров рельсовых экипажей, рассматриваемых как технические объекты.

Пусть  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$  представляет собой перечень элементов, из которых состоит технический объект. Считаем, что каждый из элементов может находиться в нескольких состояниях. Например, элемент  $\omega_1$  может находиться в состояниях  $V_{10}, V_{11}, V_{12}, \dots, V_{1k_1}$ , где под  $V_{10}$  понимаем новый элемент, который удовлетворяет всем нормативным требованиям (нормативной документации), под  $V_{11}$  понима-

ем состояние, когда некоторое нормативное требование не выполняется, но он способен выполнять свои функциональные возможности,

хотя и не так как новый, и т.д., а состояние  $V_{1k}$  соответствует понятию отказа данного элемента.



Рис. 1. Структурная схема причинно-следственной связи некоторых деталей рельсовых экипажей

Для характеристики объекта в целом введем вектор

$$a = (a_1, a_2, \dots, a_n),$$

где  $a_1$  принимает целые значения от 1 до  $k_1$ ,

$a_2$  принимает целые значения от 1 до  $k_2$

и т.д.

Очевидно, что таких векторов будет

$$K = \prod_{i=1}^n k_i.$$

Переход из состояния в состояние будем описывать переходной вероятностью:

$$P(t, b | s, a), \quad (1)$$

представляющей собой вероятность перехода из состояния  $a$  при наработке  $s$  в состояние  $b$  при наработке  $t \geq 5$ .

Вектор  $b$  устроен аналогично вектору  $a$ . Относительно вероятности перехода (1) считаем, что дальнейшая эволюция зависит только от состояния в момент наработки  $s$ , а как мы пришли в это состояние, на дальнейшем развитии не сказывается. В теории случайных процессов [3] такие процессы известны как процессы Маркова А. А.

По физическому смыслу наработка  $t$  является непрерывной величиной и больше или равна 0. Состояний в предлагаемой модели будет конечное число, равное  $K$ . Такие Марковские процессы известны как цепи Маркова с непрерывным временем [3]. Необходимо заметить, что в реальных технических объектах число деталей (элементов) составляет не одну сотню, и если каждый элемент может находиться в трех состояниях, тогда

$$K = 3^n \Big|_{n=100} = 5 \cdot 10^{47},$$

что представляет трудность не только работы, но даже перечислить их становится весьма затруднительно. Для преодоления этих трудностей производится агрегирование состояний. Другими словами, если  $A$  – набор всех векторов типа  $a$ , то это множество разбивается на ряд подмножеств, которые будем обозначать как  $A_1, A_2, \dots, A_m$ , причем их объединение равно  $A$ , а пересечения  $A_i \cap A_j = \emptyset, i \neq j$ . Задача агрегирования может быть решена различными способами. Одним из требований при агрегировании является требование, что если технический объект находится в состоянии из множества  $A_i$ , то переход из этого множества может произойти в состояние из множеств  $A_{i+1}, A_{i+2}, \dots, A_n$ . При этом требования вероятности перехода  $P(t, A_j | s, A_j), t \geq s$  будут отличными от нуля если  $j \geq i$ .

Следующее требование – при разбиении множества  $A$  исходят из характеристик технического объекта по своим функциональным возможностям, а иногда и по последствиям. Мы же пока ограничимся таким разбиением, когда состояния из  $A_{n-1}$  соответствуют потере работоспособности, а состояния из  $A_n$  будем характеризовать не только потерей работоспособности, но и имеющими «тяжелые» последствия, что в инженерной практике называют авариями.

Простейший вариант агрегирования представлен на рис. 2.

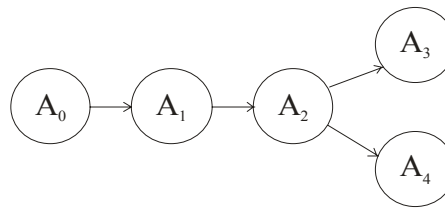


Рис. 2. Граф простейшего варианта агрегирования

В графе на рис. 2 под  $A_0$  понимают состояние, которое удовлетворяет всем нормативно-техническим требованиям, т.е. это состояние соответствует новому объекту (вагону). Состояние  $A_1$  – это такое состояние, когда не выполняются некоторые нормативно-технические требования, но работоспособность выполняется в полном объеме (например, царапина на кузове, изменение цвета покраски и т.д.). Что касается  $A_2$ , то это состояние, когда нарушаются не только нормативно-технические требования, но ухудшается их работоспособность (например, ухудшились динамические характеристики вагона). Состояние  $A_3$ , как и состояние  $A_4$ , характеризуются потерей работоспособности, т.е. имеет место отказ, но по своим последствиям состояние  $A_4$  можно назвать аварией.

Вероятности перехода из состояния в состояние характеризуются конструкцией объекта и средой или условиями эксплуатации.

В зависимости от того, в каком состоянии находится технический объект, выполняются те или иные ремонтные воздействия, и тогда граф возможных состояний, представленный на рис. 2, пополним дугами, отражающими ремонтные воздействия (рис. 3).

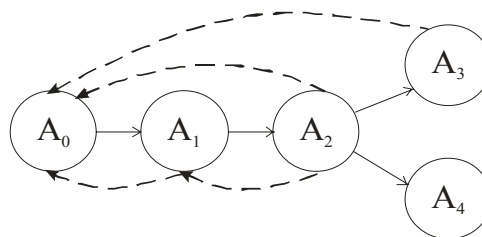


Рис. 3. Граф возможных состояний и переходов с учетом ремонтных воздействий

Если обозначить через  $P_i(t)$  вероятность того, что при наработке  $t$  объект находится в состоянии  $A_i$ , то эти вероятности определяются из системы дифференциальных уравнений А. Н. Колмогорова [4] и в рассматриваемом случае представляют собой

$$\begin{aligned}
\frac{dP_0}{dt} &= -\lambda_{01}P_0 + \mu_{10}P_1 + \mu_{20}P_2 + \mu_{30}P_3; \\
\frac{dP_1}{dt} &= \lambda_{01}P_0 - \lambda_{12}P_1 + \mu_{21}P_2; \\
\frac{dP_2}{dt} &= \lambda_{12}P_1 - \lambda_{23}P_2; \\
\frac{dP_3}{dt} &= \lambda_{23}P_2 - \mu_{30}P_3; \\
\frac{dP_4}{dt} &= \lambda_{34}P_2.
\end{aligned} \tag{2}$$

К этой системе дифференциальных уравнений необходимо добавить начальные условия, отражающие состояние объекта в начальный момент. Например, если при  $t=0$  объект был новым, то

$$P_0(0) = 1, P_k(0) = 0, k = 1, 2, 3, 4. \tag{3}$$

Система уравнений (2) и начальные условия (3) позволяют рассчитать вероятность  $P_i(t)$  и тем самым оценить конструкцию, систему ее содержания и условия ее эксплуатации.

Заметим, что при получении уравнений (2) сделано предположение о вероятности перехода, а именно

$$P(t + \Delta t, A_j | t, A_i) = \lambda_{ij}(t) \cdot \Delta t + O(\Delta t),$$

когда  $\Delta t$  достаточно мало.

Функции  $\lambda_{ij}(t)$  характеризуют интенсивность переходов как свойства конструкции и условия эксплуатации, а функции  $\mu_{ij}(t)$  отражают свойства системы содержания.

В настоящее время разработаны достаточно адекватные математические модели конструкции [1, 2, 5] и предложены модели ремонтного воздействия [6]. Объединение подобных моделей в единую систему весьма интенсивно разрабатывается, а данная работа представляет собой вариант попытки подобного объедине-

ния. Отдельным блоком оценки рисков при возможных отказах деталей и узлов рельсовых экипажей на показатели безопасности движения предлагается использовать математическую модель пространственных колебаний рельсовых экипажей с возможностью моделирования изменения состояния и параметров различных элементов [2].

Таким образом, проектирование конструкций рельсовых экипажей для определенных условий эксплуатации следует сочетать с решением задач по определению системы их технического содержания и обслуживания, что позволит определить рациональную конструкцию и ее оптимальные параметры, исходя из требуемых динамических характеристик и соответствующей системы ремонта и технического обслуживания.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мямлин С. В. Моделирование динамики рельсовых экипажей. – Д.: Новая идеология, 2002. – 240 с.
2. Мямлин С. В. Математическая модель пространственных колебаний пассажирского вагона в обычной постановке / С. В. Мямлин, В. И. Приходько // Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. – Луганськ, 2006. – № 7. – С. 266-276.
3. Карлин С. Основы теории случайных процессов. – М.: Мир, 1971. – 536 с.
4. Колмогоров А. Н. Об аналитических методах в теории вероятностей / Успехи математических наук. – Вып. 5. – 1938. – С. 5-41.
5. Камаев В. А. Оптимизация параметров ходовых частей железнодорожного подвижного состава. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.
6. Босов А. А. Функции множества и их применение. – Днепропетровск: Изд. дом «Андрей», 2007. – 182 с.

Поступила в редколлегию 27.03.2008.