

К ВОПРОСУ О ПЛАНАХ ИСПЫТАНИЙ НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Канд. техн. наук Л.А. Мурадян, инж. В.Ю. Шапошник

ДО ПИТАННЯ ПРО ПЛАНИ ВИПРОБУВАНЬ НАДІЙНОСТІ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Канд. техн. наук Л.А. Мурадян, інж. В.Ю. Шапошник

QUESTION OFF PLANS AT TRIALS RELIABILITY OF MECHANICAL SYSTEMS

Cand. of techn. sciences L. Muradian, engineer V. Shaposhnyk

Проведення випробувань на визначення показників надійності вимагає створення Програми і методики випробувань (ПМ), у яких викладено основні цілі, завдання та порядок проведення робіт. У ПМ повинні бути передбачені повнота і достовірність результатів випробувань, а також їх достатня тривалість.

У статті наведено основні плани випробувань для механічних систем, зокрема для рухомого складу залізниць. Крім того, розглянуто точкові та інтервальні оцінки показників надійності об'єктів, які проходять випробування.

Ключові слова: *план, надійність, об'єкт, механічна система, рухомий склад, вагон, експлуатаційні випробування.*

Проведение испытаний на определение показателей надежности требует создания Программы и методики испытаний (ПМ), в которых описываются основные цели, задачи и порядок проведения работ. В ПМ должны быть предусмотрены полнота и достоверность результатов испытаний, а также их достаточная продолжительность.

В статье приведены основные планы испытаний для механических систем, в частности для подвижного состава железных дорог. Кроме того, рассмотрены точечные и интервальные оценки показателей надежности испытываемых объектов.

Ключевые слова: *план, надежность, объект, механическая система, подвижной состав, вагон, эксплуатационные испытания.*

Testing to determine the parameters of reliability requires the creation of programs and test procedures, which set out the main goals, objectives and procedure of the work. The programs and test procedures should be provided for completeness and accuracy of the test results, as well as their long enough.

The article presents the basic plans for testing mechanical systems, in particular for railway rolling stock. In addition, addressed point and interval estimates of parameters of reliability test facilities.

Keywords: *plan, reliability, object, mechanical systems, rolling stock, car, operational tests.*

Введение. Одним из основных направлений Государственной программы реформирования железнодорожного транспорта на 2010-2019 годы и Транспортной стратегии Украины до 2020 года является уменьшение эксплуатационных расходов на содержание подвижного состава, что возможно достичь при повышении показателей надежности подвижного состава [1]. Высокие качества подвижного состава должны включать не только высокие показатели таких их

свойств, как производительность, комфортность, низкая стоимость и др., но и высокую надежность.

Надежность – обширнейшая область, связанная с изучением изменения свойств материалов, их внутренней структуры не только с течением времени, но и в зависимости от тех условий, в которых приходится работать изделию. Физический смысл надежности состоит в способности, свойстве изделия

сохранять свои эксплуатационные характеристики во времени.

Надежность механических систем контролируется на разных этапах создания подвижного состава, а именно при проектировании, строительстве на заводах, приемочных и эксплуатационных испытаниях. В работе рассматриваются некоторые вопросы составления Программы и методики эксплуатационных испытаний механических систем, а также методы оценки результатов испытаний.

Постановка проблемы. Ценность эксплуатационных испытаний во многом зависит от правильно разработанной методики испытаний, в которой должны быть отражены и обоснованы цель испытаний, способы подготовки механической системы к испытаниям; режимы силовых нагрузок; порядок проведения испытаний; методы обработки результатов испытаний и применяемая аппаратура для автоматизированной обработки опытных данных по заранее разработанным специальным методикам.

Проведению эксплуатационных испытаний механических систем предшествует составление программы и методики испытаний, где одним из основных пунктов является определение количества объектов, порядок проведения и окончания испытаний, т. е. разработка плана эксплуатационных испытаний. В работе разработана методика проведения анализа полученных результатов при помощи точечных и интервальных оценок показателей надежности механических объектов подвижного состава.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросы безопасности движения на железнодорожном транспорте, в т. ч. вопросы повышения надежности, всегда оставались и остаются актуальными.

Успешное их решение является комплексной задачей, осуществляемой на различных этапах конструирования, изготовления, эксплуатации и ремонта с целью доводки изделия до оптимальных параметров, включая и параметры надежности [2].

Составной частью определения надежности механических систем являются эксплуатационные испытания [3].

Решение указанных задач возможно при наличии статических данных об объектах, собранных в опытной эксплуатации [4, 5].

Интервальные оценки показателей надежности опытных образцов рассмотрены в работе [6].

Вопросы расчета показателей надежности по результатам эксплуатационных испытаний отражены в работах [7, 8].

Для подвижного состава железных дорог важной задачей остается формирование порядка и плана проведения эксплуатационных испытаний механических систем, определение необходимого количества объектов, участвующих в испытаниях, установление точности показателей надежности опытных образцов.

Определение цели и задачи исследований. Целью работы является проведение исследований по формированию основных планов эксплуатационных испытаний надежности объектов подвижного состава железных дорог. Кроме того, в статье приводится порядок расчета точечных и интервальных оценок (границ доверительных интервалов) при анализе результатов эксплуатационных испытаний.

Основная часть исследования. Испытания на надежность механических систем, в т. ч. подвижного состава железных дорог, могут быть определительными и контрольными [9].

Определительные испытания проводят для оценки фактически достигнутого уровня надежности. Для оценки надежности используют также испытания на срок службы, ускоренные испытания на срок службы, а также испытания до разрушения.

Контрольные испытания проводятся на стадиях разработки, постановки на производство и эксплуатации продукции.

Во время проведения контрольных испытаний проверяют соответствие фактических значений показателей надежности требованиям стандартов, технических заданий и технических условий, т. е. соответствует или не соответствует надежность системы предъявляемым требованиям (например, осевой нагрузке, конструкционной скорости подвижного состава и т. д.).

Наиболее часто контроль надежности проводится при приемочных и предварительных испытаниях опытных образцов, а также при периодических испытаниях изделий в условиях установившегося производства.

Испытания позволяют:

- изучить причины и закономерности возникновения отказов;
- выявить конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы, влияющие на надежность;
- выявить наименее надежные элементы;
- разработать мероприятия и рекомендации по повышению надежности;
- рассчитать продолжительность и объем технического обслуживания, количество запасных частей.

Испытания надежности подвижного состава, как правило, проводятся в лабораторных (стендовых) и эксплуатационных условиях. Испытаниям надежности в лабораторных условиях обычно подвергаются детали и узлы, а также системы (вагоны) в целом [10, 11]. Эти испытания обычно выполняют на заводах-изготовителях или в организациях-разработчиках изделий, они могут быть как определяющими, так и контрольными. При лабораторных испытаниях можно имитировать воздействия внешней среды на систему, в первую очередь условия эксплуатации (например, воздействие неровностей пути на вагон, ударные нагрузки и др.).

Лабораторные испытания могут проходить при тех же воздействиях (температуре, влажности, вибрации и т. д.) и режимах работы, которые обычно имеют место при эксплуатации вагонов.

Испытания надежности в условиях эксплуатации заключаются в сборе и обработке информации о поведении изделий подвижного состава при опытной и (или) промышленной эксплуатации подвижного состава совместно с серийными изделиями. Эти испытания обычно являются определяющими.

Эксплуатационные и лабораторные испытания дополняют друг друга. Так, преимуществами эксплуатационных испытаний на надежность, по сравнению с лабораторными, являются:

- естественный учет влияния воздействий внешней среды, например температуры, вибрации, квалификации персонала и др.;
- низкая стоимость испытаний, так как их проведение не требует дополнительных затрат на оборудование, имитирующее условия

эксплуатации, или на обслуживание испытываемых изделий;

- наличие большого числа однотипных образцов испытываемых деталей и узлов (колесных пар, тормозных колодок, рессорного подвешивания и т. д.), часто имеющих на одном вагоне, что позволяет в сравнительно короткие сроки получить статистически достоверную информацию.

Недостатками эксплуатационных испытаний по сравнению с лабораторными являются:

- невозможность проводить активный эксперимент, изменяя по желанию экспериментатора параметры внешней среды (вследствие чего эти испытания часто называют наблюдениями или подконтрольной эксплуатацией);

- неполная достоверность информации;
- меньшая оперативность информации, так как начало ее получения может иметь место только после изготовления изделий и установки их на подвижной состав.

Исходной информацией для статистического исследования, на основании которого должны быть сделаны выводы о показателях надежности, служат результаты наблюдений. Однако эти результаты могут быть разными для одних и тех же систем в зависимости от того, каким образом они были получены. Например, можно поставить на исследование одну восстанавливаемую систему и испытывать ее до получения n -го отказа, регистрируя наработки между отказами. Результатами испытаний в этом случае будут наработки t_1, \dots, t_n . Можно поставить d таких же систем, но испытывать их не восстанавливая, пока не откажут n систем ($n < d$). В этом случае результатами наблюдений будут также наработки t_1, \dots, t_n , однако оценки для определения характеристики случайной величины по результатам испытаний будут иметь другой вид.

Поэтому перед началом испытаний необходимо выработать правило, согласно которому следует проводить испытания, т. е. планирование испытаний. Выбор плана испытаний осуществляется в соответствии с целями поставленных испытаний.

Проведение испытаний на надежность (особенно лабораторных) связано со значительными затратами средств, поэтому планирование испытаний включает в себя определение

объема выборки [12] и критериев завершения испытаний исходя из заданной точности и достоверности их результатов. Формируют выборку таким образом, чтобы результаты ее испытаний могли быть распространены на совокупность систем или средств [13].

Методы планирования размера выборки базируются на предположении, что к окончанию наблюдения будет возможно подтвердить или опровергнуть наличие предполагаемых различий между исследуемыми группами. Шанс выявления статистически значимых различий зависит от размера выборки и величины истинного различия сравниваемых показателей. Если в исследование включено небольшое количество пациентов и при этом не выявлен эффект, то встает вопрос, с чем это связано: с недостаточностью данных или действительным отсутствием разницы. С другой стороны, неоправданное увеличение размера выборки неэффективно с точки зрения финансовых, трудовых и организационных затрат [14].

Испытания следует проводить для тех же условий эксплуатации, при которых в технической документации установлены показатели надежности.

Во время испытаний проводятся техническое обслуживание, периодические комиссионные осмотры, измерение параметров, определяющих отказы.

Кроме расчетных и экспериментальных методов оценки показателей надежности имеют место и расчетно-экспериментальные методы. Такие методы применяют, если по техническим, экономическим и организационным причинам невозможно или нецелесообразно применять экспериментальные методы, например для систем, которые нельзя испытывать в полном объеме (установление ресурса вагона).

Испытания проводят по определенной программе-методике (ПМ) испытаний, являющейся их организационно-методической основой. ПМ устанавливает план испытаний, методы обработки данных, правила принятия решений.

План испытаний на надежность устанавливает число объектов испытаний, порядок проведения испытаний (с восстановлением работоспособного состояния объекта после отказа, заменой отказавшего объекта или без восстановления и замены) и критерий их прекращения [15].

При формировании планов определительных испытаний наименование плана принято обозначать тремя буквами (цифрами); первая из них обозначает число испытываемых систем, вторая – наличие R или отсутствие U восстановлений на время испытаний в случае отказа, третья – критерий прекращения испытаний.

План $[NUr]$ предусматривает одновременное испытание N объектов. При этом отказавшие объекты не заменяют и не восстанавливаются. Испытания прекращают, когда число отказавших систем достигает r . В примере плана (рисунок, а) знаком умножения обозначено наличие отказа, r -й соответствует отказу 3-го объекта. Если $r = N$, тогда план испытаний принимает вид $[NUN]$, т. е. испытания прекращают после отказа всех систем.

План $[NUr]$ обычно применяют [16] для определения средней наработки на отказ и средней наработки до отказа в случае экспоненциального распределения, а план $[NUN]$ – в случае нормального распределения. Испытания по плану $[NUN]$ требуют значительных времени и числа испытываемых систем, но дают возможность полностью определить эмпирическую функцию распределения.

Планом $[NUT]$ предусмотрено одновременное испытание N систем. Эти системы после отказа не восстанавливаются. Испытания прекращают по истечении наработки каждой отказавшей системы (рисунок, б). Этот план обычно применяют для определения вероятности безотказной работы системы за время T .

Испытания, проводимые по планам $[NUr]$ и $[NUT]$, позволяют сформировать эмпирическую функцию распределения только для некоторого интервала времени, что требует сравнительно меньше информации, но позволяют быстрее закончить испытания.

$[NRT]$ – план испытаний, согласно которому одновременно начинают испытания N объектов, отказавшие во время испытаний объекты заменяют новыми, испытания прекращают по истечении времени испытаний или наработки T для каждой из N позиций (под *позицией* понимаем определенное место на стенде или объекте, применительно к которому наработка исчисляется независимо от произошедших на данной позиции замен или восстановлений – рисунок, в).

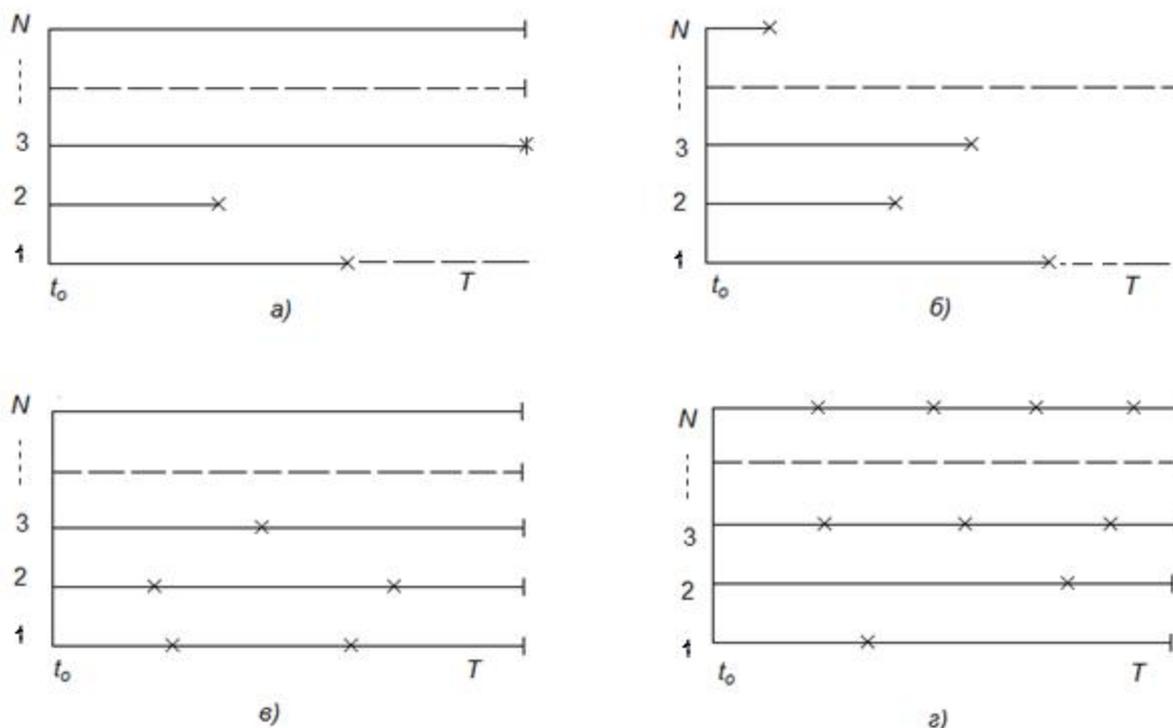


Рис. Плани испытаний:
 а – $[NUr]$; б – $[NUT]$; в – $[NRT]$; г – $[NRr]$

На рисунке, г представлена схема плана $[NRr]$ – отказавшие во время испытаний системы восстанавливают или заменяют новыми [17]. Испытания прекращают, когда суммарное по всем позициям число отказавших систем достигает r .

Задачей формирования планирования является определение минимального объема наблюдений – выбор числа испытываемых объектов N , а также минимального числа отказов r для планов $[NUr]$ и $[NRr]$ или минимальной продолжительности наблюдений T для планов $[NUT]$ и $[NRT]$.

Принятие решений должно осуществляться по определенным правилам, которые с математической точки зрения являются характеристическими функциями от результатов и планов контроля.

Результатами определительных испытаний должны являться точечные и интервальные оценки показателей надежности.

Точечная оценка — это число, вычисляемое на основе наблюдений [18]. Пусть имеются результаты k наблюдений t_1, t_2, \dots, t_k (здесь t_i - время наработки i -го объекта до отказа) над некоторой случайной величиной T

(например, временем безотказной работы) с функцией распределения $F(t, \mathcal{G})$, причем параметр \mathcal{G} этого распределения неизвестен. Необходимо найти такую функцию $\hat{g} = g(t_1, \dots, t_k)$ результатов наблюдений t_1, \dots, t_k , которую можно было бы рассматривать как оценку параметра \mathcal{G} . При таком выборе функции g каждой совокупности (t_1, \dots, t_k) будет соответствовать точка \hat{g} на числовой оси, которую называют *точечной оценкой параметра \mathcal{G}* .

Точечная оценка \hat{g} , являющаяся функцией результатов наблюдений, также случайная величина со своим собственным законом распределения, зависящим от закона распределения случайной величины T , объема наблюдений k и вида функции g . Для одного и того же неизвестного параметра \mathcal{G} обычно можно принять несколько функций g , которые могут служить в качестве оценки. Выбор требований к таким оценкам (состоятельности, несмещенности, эффективности) и методов нахождения оценки (максимального правдоподобия, моментов, квантилей,

графические) описан в книгах по теории вероятностей и математической статистике.

Статистические определения показателей надежности, рассмотренные ранее, являются их точечными оценками. При этом оценка средней наработки до отказа

$$\hat{\tau} = \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{N} \quad (1)$$

соответствует плану [NUN], так как здесь рассматриваются завершенные (не прерванные в испытаниях) наработки до отказа каждой из испытываемых систем. Это соотношение имеет место при любых законах распределения наработки до отказа.

Для экспоненциального распределения при всех других рассмотренных планах испытаний, кроме плана [NUN], точечная оценка средней наработки до отказа

$$\hat{\tau} = \frac{S}{n_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где n_{Σ} – суммарное число отказов всех систем за время испытания;

S – суммарная наработка всех систем за время испытаний.

Например, при плане [NRT]

$$S = \sum_{i=1}^l t_i + (N-l)\hat{T}, \quad (3)$$

где l – число систем, отказавших в интервале $(0, \hat{T})$;

t_i – наработка до отказа l -й системы из числа отказавших ($i = 1, 1$).

При плане испытаний [NUR]

$$S = \sum_{i=1}^r t_i + (N-r)t_r. \quad (4)$$

Для плана [NRT] и простейшего потока, у которого время между отказами подчиняется экспоненциальному распределению, оценка $\hat{\tau}$ средней наработки до отказа совпадает с оценкой $\hat{\theta}$ средней наработки на отказ:

$$\hat{\tau} = \hat{\theta} = \frac{S}{n_{\Sigma}} = \frac{N\hat{T}}{n_{\Sigma}}. \quad (5)$$

Оценка интенсивности отказов $\hat{\lambda}$ при экспоненциальном распределении может быть определена через оценку средней наработки до отказа:

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{\hat{\tau}}. \quad (6)$$

Например, при плане [NUN]

$$\hat{\lambda} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N t_i}. \quad (7)$$

Оценка параметра $\hat{\omega}$ простейшего потока совпадает с оценкой интенсивности отказов $\hat{\lambda}$. Например, при плане [NRT]

$$\hat{\omega} = \hat{\lambda} = \frac{n_{\Sigma}}{N\hat{T}}. \quad (8)$$

Оценка среднего времени восстановления, определяемая аналогично выражению (1), также соответствует плану [NUN]. Оценки вероятности отказа $\hat{Q}(t_i)$ и вероятности безотказной работы $\hat{P}(t_i)$ до момента t_i , соответственно определяемые соотношениями $Q(t_i) = N(t_i)/N$; $P(t_i) = P\{1 \geq t_i\}$, могут быть найдены за ограниченный интервал времени $t_1 = \hat{T}$ и соответствуют плану испытаний [NUT].

Точечная оценка неизвестного (оцениваемого) параметра распределения (фактически — приближенное значение параметра) является случайной величиной. Если известно ее распределение (или хотя бы дисперсия), то можно указать пределы, в которых с достаточно большой вероятностью лежит неизвестное значение параметра. Для рассмотрения точности оценки вводится понятие доверительного интервала.

Рассмотрим результаты k наблюдений t_1, \dots, t_k над случайной величиной T с функцией распределения $F(t, \mathcal{G})$, когда параметр \mathcal{G} неизвестен. Необходимо найти такую функцию $\mathcal{G}_n = g_n(t_1 \dots t_k)$ результатов наблюдений, чтобы интервал (\mathcal{G}_n, ∞) накрывал неизвестный параметр \mathcal{G} с заданной вероятностью γ_1 :

$$P\{\mathcal{G} \in \mathcal{G}_n\} = \gamma_1. \quad (9)$$

Величину \mathcal{G}_n називають *нижньої довірительної границей* параметра \mathcal{G} при односторонній довірительній вероятності γ_1 .

Для заданної вероятності γ_2 по тій же сукупності спостережень може бути знайдена функція $\mathcal{G}_{ep} = g_{ep}(t_1 \dots t_k)$, така, що інтервал $(0, \mathcal{G}_{ep})$ накриває параметр \mathcal{G} с вероятністю γ_2 :

$$P\{\mathcal{G} < \mathcal{G}_n\} = \gamma_1. \quad (10)$$

$$P\{\mathcal{G}_n < \mathcal{G} < \mathcal{G}_{ep}\} = 1 - P\{\mathcal{G} < \mathcal{G}_n\} - P\{\mathcal{G} > \mathcal{G}_{ep}\} = 1 - (1 - \gamma_1) - (1 - \gamma_2) = \gamma, \quad (11)$$

де $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - 1$.

Обычно приймають, що $\gamma_1 = \gamma_2$, тоді $\gamma = 2\gamma_1 - 1$.

Значення довірительного інтервала тем менше, чим більше число k спостережень (наприклад, чим більше число відмов при випробуваннях) і чим менше значення γ довірительної вероятності.

Визначення меж довірительного інтервала заключається в наступному. Так як оцінка $\hat{\mathcal{G}}$ невідомого параметра \mathcal{G} є випадковою величиною, то знаходимо закон її розподілу. Далі визначаємо інтервал $(\mathcal{G}_n, \mathcal{G}_{ep})$, в який випадкова величина $\hat{\mathcal{G}}$ потрапляє с вероятністю γ .

Приближений спосіб побудови довірительних інтервалів середньої наработки до відмови для плану $[NUN]$ при довільному розподілі ґрунтується на тому, що при числі випробуваних виробів $N > 15 \div 20$ середнє арифметичне розподілено приблизно нормально с математичним очікуванням τ , а невідоме значення дисперсії замінюється її точною оцінкою в вигляді

$$\hat{D} = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - \hat{\tau})^2}{N-1}. \quad (12)$$

Визначення довірительного інтервала показателів надійності при експоненціальному

Величину \mathcal{G}_{ep} називають *верхньої довірительної границей* параметра \mathcal{G} при односторонній довірительній вероятності γ_2 .

Нижня і верхня довірительні межі утворюють довірительний інтервал, який с вероятністю γ накриває на числової осі невідоме значення параметра \mathcal{G} . При $\gamma_1 > 0,5$ і $\gamma_2 > 0,5$ (довірительні вероятності γ_1 і γ_2 звичайно вибираються не менше 0,8)

розподілу наработки між відмовами і різних планів випробувань ґрунтується на відомому з математичної статистики [19].

Припустимо, що проводяться випробування одного відновлюваного виробу до наступлення r -го відмови, що відповідає плану $[NRr]$, при цьому сумарна наработка $S = \sum_{i=1}^r t_i$, де t_i – наработка між $(i-1)$ -м і i -м відмовами. Тоді величина $z = 2S / \tilde{\tau}$ має χ^2 – розподіл с двома степенями вольності, густина розподілу якого

$$f(z) = \frac{1}{2T(r)} z^{(r-1)} e^{-\frac{z}{2}}, \quad (13)$$

де $T(r) = (r-1)!$ – гамма-функція.

В таблиці приведені довірительні інтервали λ_1 і λ_2 інтенсивності відмов при експоненціальному розподілі і різних планах випробувань [20].

Висновки. Проведені дослідження дозволяють раціонально сформувати план експлуатаційних випробувань механічних систем, в частині об'єктів залізничного подвижного складу, і визначити точні і інтервальні оцінки при аналізі результатів випробувань. Крім того, дані дослідження створюють можливість більш точно визначити показателі надійності механічних систем.

План испытаний	Интенсивность отказов λ или параметр потока отказов ω при экспоненциальном распределении	
	Нижняя граница	Верхняя граница
[NUN]	$\frac{\tilde{\lambda}\xi_{1-\beta}^2(2n_{\Sigma})}{2n_{\Sigma}}$	$\frac{\tilde{\lambda}\xi_{1-\beta}^2(2n_{\Sigma})}{2n_{\Sigma}}$
[NUT]	$\frac{\tilde{\lambda}\xi_{1-\beta}^2(2n_{\Sigma} + 2)}{2n_{\Sigma}}$	$\frac{\tilde{\lambda}\xi_{1+\beta}^2(2n_{\Sigma} + 2)}{2n_{\Sigma}}$
[NUR]	$\frac{\tilde{\lambda}\xi_{1-\beta}^2(2n_{\Sigma})}{2(n_{\Sigma} - 1)}$	$\frac{\tilde{\lambda}\xi_{1+\beta}^2(2n_{\Sigma})}{2(n_{\Sigma} - 1)}$
[NRT]	$\frac{\tilde{\omega}\xi_{1-\beta}^2(2n_{\Sigma})}{2n_{\Sigma}}$	$\frac{\tilde{\omega}\xi_{1+\beta}^2(2n_{\Sigma})}{2n_{\Sigma}}$
[NRr]	$\frac{\tilde{\omega}\xi_{1-\beta}^2(2n_{\Sigma})}{2(n_{\Sigma} - 1)}$	$\frac{\tilde{\omega}\xi_{1+\beta}^2(2n_{\Sigma})}{2(n_{\Sigma} - 1)}$

Примечание. $\xi_p^2(l)$ – квантиль ξ^2 распределения p с числом степеней свободы l ; n_{Σ} – суммарное число отказов в испытаниях.

Список использованных источников

1. Про затвердження Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010–2019 роки [Електронний ресурс]: постанова Кабінету Міністрів України від 26.10.2011 р. № 1106. – Режим доступа : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1106-2011>
2. Устич, П.А. Надежность рельсового нетягового подвижного состава [Текст] / П.А. Устич. – М.: УМЦ МПС России, 2004. – 416 с.
3. Матвиевский, В.Р. Надежность механических систем [Текст] / В.Р. Матвиевский. – М.: МГИЭМ, 2002. – 113 с.
4. Беренштейн, М.Г. Ускорение испытаний нового подвижного состава [Текст] / М.Г. Беренштейн, Л.Д. Кузьмич, С.А. Сапожников // Железнодорожный транспорт. – 1974. – № 4. – С. 61–65.
5. Беляев, Ю.К. Статистические методы обработки результатов испытаний на надежность [Текст] / Ю.К. Беляев. – М.: Знание, 1982. – 100 с.
6. Павлов, И.В. Доверительная оценка показателей надежности сложных систем [Текст] / И.В. Павлов. – М.: Знание, 1979. – 486 с.
7. Мурадян, Л.А. Исследование действующих условий эксплуатации и анализ причин сокращения ресурса работы железнодорожных колес [Текст] / Л.А. Мурадян, В.Г. Анофриев // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 34. – С. 206-210.

8. Мурадян, Л.А. Испытания перспективных тормозных колодок на железных дорогах Украины [Текст] / Л.А. Мурадян, В.Ю. Шапошник, Винстрот Бернд Уве, С.П. Муковоз. – Локомотив інформ. – 2015. – №7-8 (109-110). – С. 20-22.
9. Северцев, Н.А. Надежность сложных систем в эксплуатации и отработке [Текст] / Н.А. Северцев. – М.: Высшая школа, 1989. – 432 с.
10. Савчук, О.М. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения [Текст] / О.М. Савчук, В.К. Бруякин, Л.А. Мурадян [и др.] // Вагонный парк. – 2009. – № 5/6. – С. 30-32.
11. Савчук, О.М. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения [Текст] / О.М. Савчук, В.К. Бруякин, Л.А. Мурадян [и др.] // Вагонный парк. – 2009. – № 7/8. – С. 8-11.
12. Мурадян, Л.А. Определение количества объектов для проведения эксплуатационных испытаний вагонной техники [Текст] / Л.А. Мурадян // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 139. – С. 83-87.
13. Мямлин, С.В. Исследования характера величин износа трибосистем дизелей специального самоходного подвижного состава железной дороги [Текст] / С.В. Мямлин, Д.М. Барановский // Наука и прогресс транспорта: Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2011. – Вып. 37 / 2011. – С. 32-43.
14. Койчубеков, Б.К. Определение размера выборки при планировании научного исследования [Текст] / Б.К. Койчубеков, М.А. Сорокина, К.Э. Мхитарян // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 4. – С. 71-74.
15. ДСТУ 3004-95. Надежность техники. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным [Текст]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 123 с.
16. Орлов, А.И. Прикладная статистика [Текст] / А.И. Орлов. – М.: Издательство «Экзамен», 2004. – 656 с.
17. Ястребенецкий, М.А. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами [Текст]: учеб. пособие для вузов / М.А. Ястребенецкий, Г.М. Иванова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 264 с.
18. Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения [Текст]: учеб. пособие для вузов / Л.А. Овчаров, Е.С. Вентцель. – 2-е изд., стереот. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.
19. ГОСТ 27.3004-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения [Текст]. М.: Издательство стандартов, 1997. – 123 с.
20. ГОСТ 27.410-87. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 94 с.

Рецензент д-р техн. наук, профессор С.В. Мямлин

Мурадян Леонтій Абрамович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вагонів та вагонного господарства, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Тел.: (056) 373-15-19. E-mail: leon59@bk.ru.

Шапошник Владислав Юрійович, інженер I категорії, галузева науково-дослідна лабораторія «Вагони», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Тел.: (056) 373-15-19. E-mail: v.sh91@mail.ru.

Muradian L., candidate of techn. sciences department «Car and Car Facilities» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan. Tel. +38 (056) 373 15 19. E-mail leon59@bk.ru.

Shaposhnyk V., engineer of Wagons Laboratory of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan. Tel. +38 (056) 373 15 19. E-mail v.sh91@mail.ru.

Стаття прийнята 20.10.2015 р.