



Неразрушающий контроль: анализ надёжности ПС



Александр ВОРОБЬЁВ
Alexander A. VOROBIEV

Валерий КАРПОВ
Valery A. KARPOV



Сергей СОКОЛОВ
Sergey A. SOKOLOV

Воробьев Александр Алексеевич — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Карпов Валерий Александрович — начальник лаборатории метрологического центра Приволжской железной дороги, Аткарск, Россия.

Соколов Сергей Андреевич — инженер, руководитель группы программирования, МИИТ, Москва, Россия.

В статье изложена методика расчёта показателей безотказности и долговечности деталей подвижного состава по результатам неразрушающего контроля. Апробация ее осуществлена на примере осей колесных пар электровозов ВЛ80. Для расчетов использовались данные, полученные при проведении технического обслуживания электровозов в локомотивных депо Приволжской железной дороги в 2010-2011 гг. Из полученных материалов следует, что наработка до отказа осей колесных пар подчиняется экспоненциальному закону распределения, интенсивность отказов постоянна, и это не предполагает ухудшения их технического состояния с увеличением наработки в пределах до 4,5 млн км, а сами отказы носят случайный (внезапный) характер.

Ключевые слова: железная дорога, тяговый подвижной состав, неразрушающий контроль, колесная пара, локомотив, электровоз ВЛ80, надежность, методика расчета.

На современном этапе развития железнодорожного транспорта с увеличением скоростей движения, ростом интенсивности перевозок и веса поездов обеспечение безопасности движения во многом связано с созданием новых типов тягового подвижного состава (ТПС). Увеличение эксплуатационной надежности, которая достигается за счет необходимого запаса прочности, закладывается при проектировании, а также поддерживается действующей в ОАО «РЖД» планово-предупредительной системой технического обслуживания и ремонта, предусматривающей применение в технологических процессах методов и средств неразрушающего контроля (НК) ответственных узлов и деталей. Обеспечение безопасности движения за счет своевременного обнаружения заводских и усталостных эксплуатационных дефектов в ответственных элементах подвижного состава приносит огромный экономический эффект.

Одним из наиболее распространенных методов НК при производстве ремонта тягового подвижного состава является ультразвуковой. Он основан на изучении и последующем анализе параметров высокочастотных упругих механических колебаний

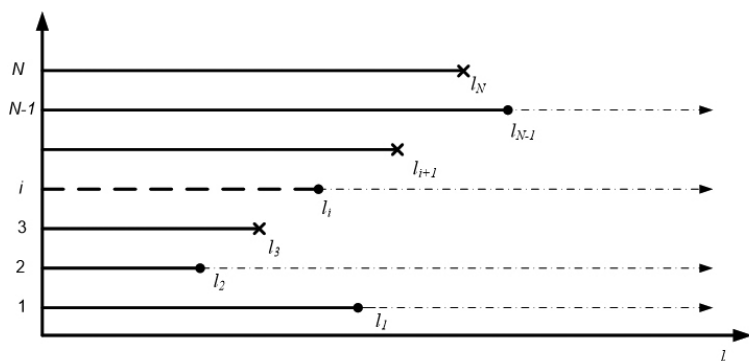


Рис. 1. Представление информации о наработках выборки N деталей в процессе их неразрушающего контроля:
• – деталь работоспособна;
× – неработоспособна (отказ).

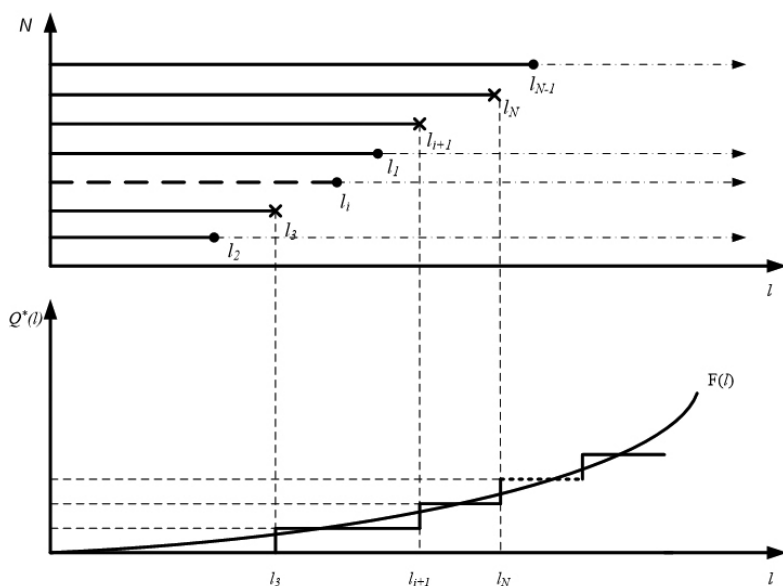


Рис. 2. Вариационный ряд наработок выборки N деталей, подвергнутых неразрушающему контролю, и эмпирическая функция вероятности отказа.

(ультразвуковых волн), прошедших через контролируемое изделие. Ультразвуковой метод применяют для контроля элементов колесной пары: оси, ступицы, бандажа, большого зубчатого колеса. В ходе изготовления, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта подвижного состава железных дорог технологическим процессом предусмотрен немалый объем НК деталей и узлов. Анализ показывает, что его результаты, как правило, ограничиваются оценкой процента брака (вероятности отказа) конкретной детали, обусловленного той или иной причиной.

Партия проконтролированных деталей (выборка) перед или по мере восстановления подвижного состава имеет обычно разную наработку от момента изготовления. Поэтому по информации о результатах НК детали невозможно определить зависимость вероятности отказа от ее наработки. В этом случае

значение процента брака (вероятности отказа) является усредненной точечной оценкой, не позволяющей прогнозировать техническое состояние детали. Если же известна наработка каждой проконтролированной детали из выборки N от момента её изготовления, то информацию о наработках всех N деталей в процессе контроля во времени можно вполне представить графически (рис. 1).

Если наработки на момент контроля N деталей выстроить в вариационный ряд (рис. 2), то полученная информация позволит оценивать точечную оценку вероятности отказа Q^* [1] для конкретного значения наработки.

Вероятность отказа $Q^*(l_i)$ при наработке l_i проконтролированных i деталей, k из которых оказались дефектными, будет:

$$Q^*(l_i) = \sum_{i=1}^k \frac{1}{N(l_i)}, \quad (1)$$



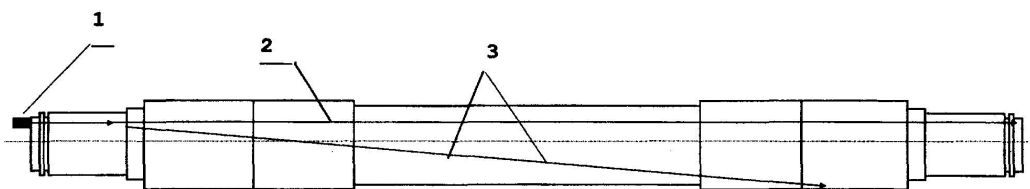


Рис. 3. Акустическая схема контроля дальней подступичной части оси колесной пары электровоза ВЛ 80 и оценка оси на «прозвучиваемость»:
1 – прямой преобразователь; 2 – ось ультразвукового луча; 3 – «боковые» лучи.

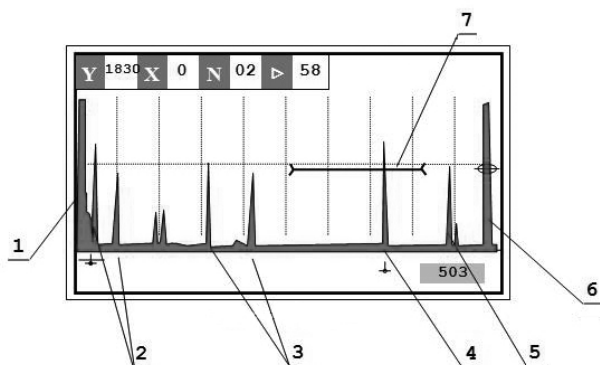


Рис. 4. Сигналы на экране ультразвукового дефектоскопа УД2–102:
1 – передний фронт зондирующего импульса; 2 – сигналы от кромок колец подшипников на шейке оси; 3 – помехи от кромок колесного центра и внутренней галтели подступичной части оси (с учетом трансформации луча продольной волны в поперечную); 4 – сигнал от трещины в зоне под внутренней кромкой ступицы дальнего колеса; 5 – сигнал от галтели шейки оси; 6 – «донный» сигнал; 7 – зона контроля.

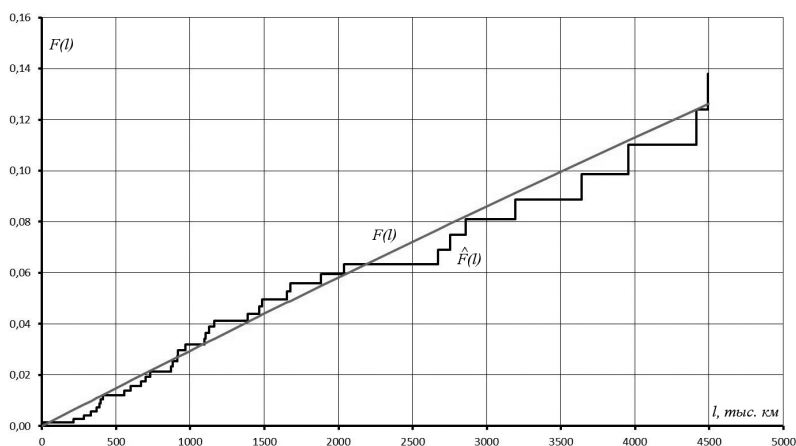


Рис. 5. Эмпирическая и теоретическая экспоненциальная функция распределения наработки до отказа оси колёсной пары.

где i – номер (в вариационном ряду) отказавшей детали;

l_i – наработка до отказа детали;

$N(l_i)$ – количество деталей, находящихся под наблюдением при наработке l_i и с учётом отказавших до наработки l_i ;

k – количество деталей, отказавших до наработки l_i .

Совокупность точечных оценок вероятности отказа детали, полученных при разных наработках, позволяет построить эмпирическую зависимость её от наработки (эмпирическую функцию распределения наработки до отказа $\hat{F}(l)$). При объединении информации n выборок, каждая из которых представляет N одноимённых дета-

Таблица 1

Расчётные значения показателей безотказности осей колёсных пар электровозов ВЛ 80

Наработка до от- каза I , тыс. км	Кол-во осей ко- лёсных пар $N(I)$	Приращение наработки ΔI , тыс. км	Приращение эмпирической функции распре- деления $\Delta F(I)$	Приращение эмпирической функции плот- ности наработки до отказа $\Delta f(I)$, 1/тыс. км	Расчётное значение интенсивности отказов $\lambda(I)$, 1/тыс. км
1	2	3	4	5	6
4,849	734	4,849	0,001362398	0,00028096	0,00028135
213,57	701	208,721	0,001426534	0,00000683	0,00000685
283	679	69,43	0,001472754	0,00002121	0,00002130
332,291	663	49,291	0,001508296	0,00003060	0,00003078
372	635	39,709	0,001574803	0,00003966	0,00003995
390,117	629	18,117	0,001589825	0,00008775	0,00008854
398,5	625	8,383	0,0016	0,00019086	0,00019289
414,9	619	16,4	0,001615509	0,00009851	0,00009972
558,114	581	143,214	0,00172117	0,00001202	0,00001219
601,45	568	43,336	0,001760563	0,00004063	0,00004127
670,432	543	68,982	0,001841621	0,00002670	0,00002717
702,517	532	32,085	0,001879699	0,00005858	0,00005974
732,9	522	30,383	0,001915709	0,00006305	0,00006442
873,329	484	140,429	0,002066116	0,00001471	0,00001506
882,6	480	9,271	0,002083333	0,00022472	0,00023058
914,798	470	32,198	0,00212766	0,00006608	0,00006795
920,366	468	5,568	0,002136752	0,00038376	0,00039550
969,95	458	49,584	0,002183406	0,00004403	0,00004548
1097,209	429	127,259	0,002331002	0,00001832	0,00001897
1107,16	428	9,951	0,002336449	0,00023480	0,00024370
1129,356	422	22,196	0,002369668	0,00010676	0,00011108
1163,952	414	34,596	0,002415459	0,00006982	0,00007283
1388,631	376	224,679	0,002659574	0,00001184	0,00001238
1467,024	354	78,393	0,002824859	0,00003603	0,00003780
1486,241	352	19,217	0,002840909	0,00014783	0,00015556
1652,679	316	166,438	0,003164557	0,00001901	0,00002007
1675,37	315	22,691	0,003174603	0,00013991	0,00014820
1884,324	281	208,954	0,003558719	0,00001703	0,00001811
2039,842	256	155,518	0,00390625	0,00002512	0,00002682
2672,298	178	632,456	0,005617978	0,00000888	0,00000954
2754,921	174	82,623	0,005747126	0,00006956	0,00007518
2857,441	163	102,52	0,006134969	0,00005984	0,00006511
3194,424	130	336,983	0,007692308	0,00002283	0,00002505
3640,6	101	446,176	0,00990099	0,00002219	0,00002462
3957,154	86	316,554	0,011627907	0,00003673	0,00004128
4414,488	72	457,334	0,013888889	0,00003037	0,00003467
4494,158	72	79,67	0,013888889	0,00017433	0,00020223

лей, подвергнутых неразрушающему контролю, получим выборку $n \times N$ достаточного большого объема, что даст существенно повысить достоверность оценки эмпирической функции распределения наработки до отказа.

По полученной в процессе контроля усеченной справа представительной выборке наработок до отказа рассматриваемой детали необходимо определить вид и пара-

метры закона распределения наработки до отказа [1], то есть построить теоретическую функцию её распределения $F(I)$.

Усечение выборки обуславливается тем, что вероятность того, что в выборке контролируемых деталей все они окажутся бракованными, практически равна нулю.

По теоретической функции распределения наработки до отказа становится



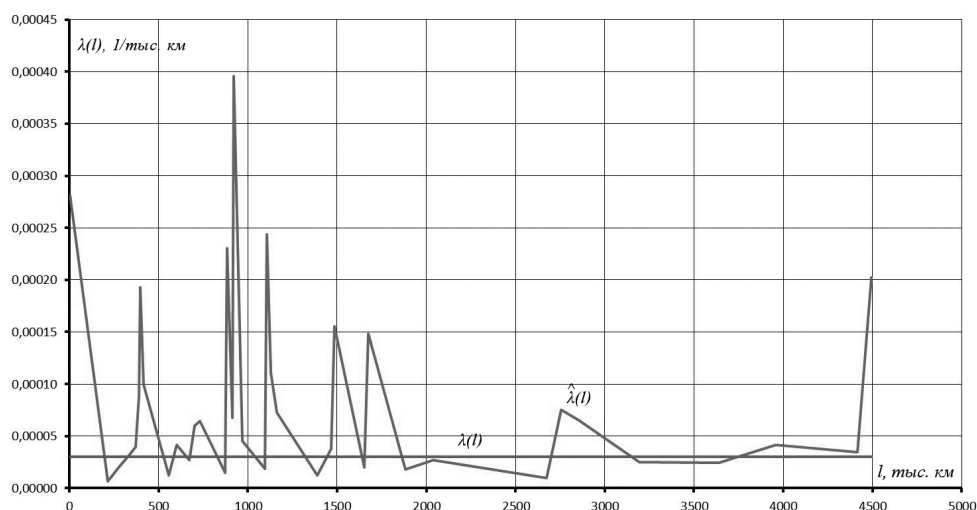


Рис. 6. Зависимости от наработки интенсивности отказов осей колёсных пар.

возможным определять показатели безотказности и долговечности [2] рассматриваемой детали. Апробация предложенной методики осуществлена по информации о результатах НК осей колёсных пар электровозов. Из 734 проконтролированных деталей, имеющих различную наработку (от 5 до 4,5 млн км), обнаружено 37 дефектных. Контроль на предприятиях проводился в соответствии с нормативной документацией, технологической картой, которая создана на основе стандартов ОАО «РЖД» и типовых инструкций по НК. Современные ультразвуковые дефектоскопы, в частности УД2–102, позволяют достоверно определять координаты залегания и условные размеры дефекта. Технология контроля заключается в подготовке дефектоскопа, настройке на определенную зону оси, установке преобразователя на поверхность контролируемого участка и его перемещении по заданной траектории (рис. 3).

При наличии брака на пути распространения ультразвуковой волны часть её отражается от дефекта и попадает на преобразователь, вследствие чего на экране дефектоскопа отображается сигнал в виде амплитуды (рис. 4).

На основании выборки наработок осей колёсных пар электровозов ВЛ 80 от начала их эксплуатации до момента проведения НК рассчитана усечённая эмпирическая функция распределения (таблица 1, рис. 5).

По эмпирической функции (рис. 5) методом наименьших квадратов определены вид и параметры закона распределения $F(l)$, наилучшим образом описывающего экспериментальные данные наработок до отказа [1] по результатам неразрушающего контроля осей колёсных пар электровозов.

Установлено, что полученная выборка наработок до отказа колёсных пар на интервале их контроля от 0 до 4,5 млн км подчиняется экспоненциальному закону распределения с постоянной интенсивностью отказа $\lambda=0,00003$ 1/тыс. км (рис. 6).

При достижении наработки осей колёсных пар 4,5 млн км примерно 14% их отказывает. Так как скорость отказов на рассматриваемом интервале остаётся постоянной, есть основание сделать вывод, что срок службы осей колёсных пар не исчерпан, при наработке они не достигают предельного состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горский А. В., Воробьёв А. А. Оптимизация системы ремонта локомотивов. — М.: Транспорт, 1994. — 208 с.
2. Горский А. В., Воробьёв А. А. Надёжность электроподвижного состава. — М.: Маршрут, 2005. — 302 с.
3. Скрипник В. М., Назин А. Е. Оценка надёжности технических систем по цезурированным выборкам. — Минск: Наука и техника, 1981. — 143 с.
4. Смит Д. Дж. Безотказность, ремонтпригодность и риск: Пер. с англ. — М.: Группа ИДТ, 2007. — 432 с.
5. Хастингс Н., Пикок Дж. Справочник по статистическим распределениям: Пер. с англ. — М.: Статистика, 1980. — 95 с. ●