

# СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИМИТАЦИОННЫЕ ПРОГНОЗНЫЕ МОДЕЛИ ОЦЕНОК ИЗНОСА БАНДАЖЕЙ КОЛЁСНЫХ ПАР ЛОКОМОТИВОВ

*Леонас Повилас Лингайтис, Шарунас Микалюнас, Валентинас Подвезько*

*Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса  
Басанавичяус 28, ЛТ-03224 Вильнюс-6, Литва  
Тел. (+370 5) 2744952. Факс. (+370 5) 2745069. E-mail: smikal@ti.vtu.lt*

Техническое состояние локомотивов является одной из основ надёжности и безопасности движения подвижного состава, а уменьшение степени износа колёсных пар локомотивов значительно сокращает эксплуатационные расходы железнодорожного транспорта. Всему этому способствует смазка гребней колёсных пар. Многочисленные результаты измерений позволили создать вероятностные прогнозные модели оценок степени износа бандажей и гребней колёсных пар, а применение метода статистического имитационного моделирования выделяет из приемлемых прогнозных моделей наиболее устойчивые к возможным случайным колебаниям переменных.

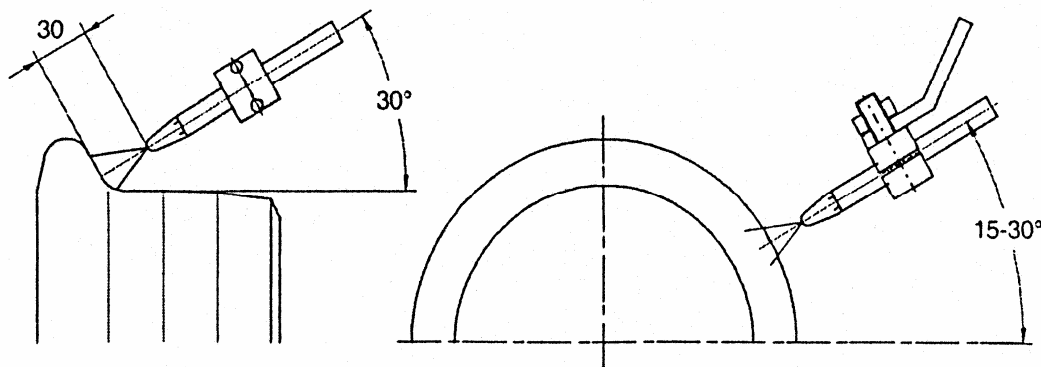
**Ключевые слова:** износ колёсных пар, вероятностное прогнозирование, имитационное моделирование

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации локомотива профиль качения колеса постепенно утрачивает конусообразность и на нём появляется полоса стирания. На износ бандажей колёсных пар локомотивов влияет множество случайных факторов: физические свойства и однородность металла бандажей, его химический состав, качество изготовления, климатические условия эксплуатации, режимы нагрузки и их цикличность, продолжительность работы при максимальной нагрузке, температурные условия эксплуатации, влажность воздуха и его запылённость, загрязнённость поверхности бандажа абразивными частицами, состояние пути, от которого зависит величина и интенсивность динамических нагрузок на подвижной состав, скорость движения, условия смазки места контакта колеса и рельса [1–3].

Среди перечисленных факторов невозможно выделить единственного, наиболее важного. Интенсивность износа колесных пар как комплексного фактора можно установить методом экспериментов.

Желая уменьшить износ бандажей, в локомотивах можно использовать систему смазки гребней бандажей колёсных пар (рис. 1).



*Рис.1. Схема смазки гребней колёсных пар*

Одна из таких – система FluiLub смазки гребней бандажей колёсных пар немецкой фирмы Vaier+Köppel. Основой её действия является подача смазки на гребень бандажа колеса локомотива при движении на кривых участках, когда трение между рельсом и гребнем колеса максимальное. В зависимости от направления движения локомотива смазываются гребни передних колёс каждой секции локомотива.

Цель данной работы – установление тенденции износа колёсных пар, оценка влияния смазки бандажей колёсных пар на степень их износа, построение математических моделей, описывающих степень износа гребней и бандажей колёсных пар, дающих возможность прогнозировать зависимость износа от пройденного пути, а также проверка устойчивости выбранных прогнозных моделей к случайным возможным изменениям параметров модели.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИЗНОСА ГРЕБНЕЙ И БАНДАЖЕЙ КОЛЁС ЛОКОМОТИВОВ

Основой построения математических моделей, описывающих степень износа гребней и бандажей колёсных пар локомотивов, составляют статистические данные – результаты конкретных измерений их износа.

Для эксперимента были выбраны два локомотива 2М62 (в двух секциях каждого локомотива 12 колёсных пар) без использования системы смазки и один локомотив 2М62, на котором была смонтирована система смазки гребней колёсных пар FluiLub немецкой фирмы Vaier+Köppel. Локомотивы 2М62 в период проведения эксперимента составляли около 80 % всего локомотивного парка Литвы.

На гребни бандажей локомотива, в котором смонтирована система смазки колёсных пар, наносилась синтетическое масло Сісо TL 1400 В зимой и Сісо TL 1500 В в летнее время. В их составе содержание твёрдых частиц – соответственно 15% и 30%. Давление воздуха в этой системе – 0,7 МПа.

В начале эксперимента все колёсные пары были новыми, т. е. размеры их бандажей соответствовали номинальным параметрам, приведенным в табл. 1.

**Таблица 1.** Основные контролируемые размеры профиля бандажа

Контролируемые размеры	Прокат бандажа $i$ , мм	Толщина гребня $a$ , мм	Толщина бандажа $h$ , мм
Начальные (номинальные)	0	33,0	77,0
Предельные	7,0	25,0	36,0*

\*- эта толщина бандажа в процессе эксплуатации достигается вследствие обточки, когда необходимо восстановить профиль качения колёсной пары из-за значительного износа гребня (когда  $a < 25,0$  мм).

Измерения износа профиля колёсных пар проводились каждый месяц, когда локомотивы приезжали в депо на техническую профилактику (ТР-3), либо для ремонтных работ [6]. Средний пробег локомотивов между обмерами без системы смазки гребней составил 10785 км, а со смазкой колёсных пар – 10504 км.

На интенсивность стирания колёсных пар локомотивов, а особенно гребней, большое влияние имеет кривизна пути, поэтому в процессе выполнения эксперимента локомотивы курсировали по путям с радиусом кривизны, соответствующим среднему значению для Литвы. Отношение кривых и прямых участков железных дорог Литвы составляет 1 : 3.

Задавалось требование, чтобы бандажи колёсных пар с системой смазки и без неё эксплуатировались в однотипных условиях, т. е. на тех же участках пути, выполняемая ими работа была бы одинакова, а обе секции локомотива всегда должны были работать вместе.

За период наблюдений максимальный пробег колёсных пар без системы смазки составил 135000 км, а с системой смазки – 141000 км. Всего было получено 450 значений каждого контролируемого параметра для колёсных пар без системы смазки и 300 значений для колёсных пар с системой смазки.

В процессе эксперимента измерялись две характеристики:  $i$  – степень износа бандажей и  $A$  – интенсивность стирания гребня колёс. В табл. 2 приводятся средние значения и соответствующие средние квадратические отклонения для характеристики  $A$  с применением смазки и без неё в зависимости от пройденного пути  $L$ . Аналогичная таблица была получена и для величины  $i$ .

Учитывая стохастический характер исследуемых величин  $i$  – степени износа бандажа и  $A$  – интенсивности стирания гребня, для обработки результатов наблюдений был использован регрессионный анализ и методы вероятностного прогнозирования [4, 7]. Необходимо было найти математические кривые – линии регрессии, наилучшим образом описывающие зависимости  $i$  и  $A$  от пройденного пути  $L$  и пригодные для осуществления прогнозов величины  $i$  и  $A$ . С заданной вероятностью  $P$  (близкой к 1) рассчитывались доверительные интервалы средних наблюдаемых и прогнозных значений.

**Таблица 2.** Числовые характеристики износа гребня колеса

Пробег $L$ , тыс. км	Без смазки		Пробег $L$ , тыс. км	Со смазкой	
	Числ. характеристики			Числ. характеристики	
	среднее $\bar{A}$ , мм	Среднее квадр. отклонение $\sigma$ , мм		среднее $\bar{A}$ , мм	Среднее квадр. отклонение $\sigma$ , мм
9,9	1,23	0,391	13,5	1,25	0,565
10,7	1,84	0,509	24,4	1,54	0,716
19,2	2,23	0,630	34,4	1,81	0,648
23,3	2,57	0,793	44,4	2,21	1,303
32,1	2,89	0,791	52,3	2,10	1,50
35,8	2,89	0,951	62,4	2,69	1,36
42,1	3,19	0,996	76,9	2,98	1,107
47,6	3,36	1,23	84,5	3,05	2,474
49,9	3,84	0,832	95,8	2,92	2,332
55,3	3,60	0,929	103,2	3,28	2,732
61,1	3,55	0,813	115,5	3,73	2,405
64,5	4,05	1,225	127,5	3,69	2,654
73,2	4,76	1,681	141,6	3,83	2,896
74,4	3,76	2,11			
86,5	5,47	2,045			
90,2	4,33	1,424			
102,0	5,86	1,786			
103,4	4,35	1,352			
110,6	5,75	0,417			
115,1	4,99	1,906			
121,3	6,13	0,729			
129,3	5,38	2,52			
135,5	6,10	0,44			

Были вычислены параметры достаточно большого класса зависимостей: линейных, квадратичных, кубических, логарифмических, гиперболических, экспоненциальных для описания результатов эксперимента с целью выбора одной, наиболее приемлемой аппроксимирующей функции. Наилучшая зависимость выбиралась по минимальному остаточному среднему квадратическому отклонению  $S$ , рассчитываемому каждый раз для величин  $i$  и  $A$ . Коэффициенты зависимостей вычислялись с использованием метода наименьших квадратов [7].

Расчеты проводились при помощи математического пакета MAPLE-7 [5], а для построения графиков использовался пакет EXCEL-2000.

Наилучшими для описания процессов и осуществления прогнозов оказались зависимости, указанные в табл. 3.

Доверительные интервалы для  $i$  и  $A$  рассчитывались по формулам [7]:

$$i_L \pm t_{v,p} S_i \sqrt{X_L^T (X^T X)^{-1} X_L}, \tag{1}$$

$$A_L \pm t_{v,p} S_A \sqrt{X_L^T (X^T X)^{-1} X_L}, \tag{2}$$

где  $i_L$  и  $A_L$  – расчётные (теоретические) значения  $i$  и  $A$ ,  $S_i$  и  $S_A$  – соответствующие средние квадратические отклонения,  $X$  – матрица исходных данных, зависящая от используемой регрессионной зависимости,  $t_{v,p}$  – соответствующее значение из таблицы распределения Стьюдента,  $X_L$  –  $L$ -я строка матрицы  $X$  [7].

Доверительные интервалы рассчитывались и графики изображались для доверительной вероятности  $P=0,95$  ( $\alpha=0,05$ ).

Математические модели степени износа для величины  $A$  и их доверительные интервалы изображены на рис. 2. Аналогичные графики получены и для величины  $i$ .

**Таблица 3.** Наилучшие регрессионные кривые для описания и прогнозов  $i$  и  $A$

№	Зависимости	$S_i$	$S_A$
1	без системы смазки		
	$i = -0,645 \cdot 10^{-6} \cdot L + 0,693 \cdot 10^{-9} \cdot L^2 - 0,437 \cdot 10^{-14} \cdot L^3$	1,1515	–
	$i = -0,0951 + 0,482 \cdot 10^{-5} \cdot L + 0,608 \cdot 10^{-9} \cdot L^2 - 0,399 \cdot 10^{-14} \cdot L^3$	1,1522	–
	$i = -0,35 + 0,387 \cdot 10^{-4} \cdot L - 0,129 \cdot 10^{-9} \cdot L^2$	1,1666	–
	$i = 0,0324 - 0,968 \cdot \ln(L+1) + 0,1 \cdot \ln^2(L+1)$	1,1675	–
	с системой смазки		
	$i = -0,695 \cdot 10^{-5} \cdot L + 0,506 \cdot 10^{-9} \cdot L^2 - 0,238 \cdot 10^{-14} \cdot L^3$	0,9468	–
	$i = -0,019 - 0,6 \cdot 10^{-5} \cdot L + 0,493 \cdot 10^{-9} \cdot L^2 - 0,233 \cdot 10^{-14} \cdot L^3$	0,9483	–
	$i = -0,294 + 0,21 \cdot 10^{-4} \cdot L$	0,9570	–
	$i = -0,276 + 0,202 \cdot 10^{-4} \cdot L + 0,63 \cdot 10^{-11} \cdot L^2$	0,9585	–
2	без системы смазки		
	$A = 0,556 \cdot 10^{-2} - \ln(L+1) + 0,124 \cdot \ln^2(L+1)$	–	1,0478
	$A = 0,252 + 0,108 \cdot 10^{-3} \cdot L - 0,992 \cdot 10^{-9} \cdot L^2 + 0,374 \cdot 10^{-14} \cdot L^3$	–	1,0548
	$A = 0,123 \cdot 10^{-3} \cdot L - 0,122 \cdot 10^{-8} \cdot L^2 + 0,475 \cdot 10^{-14} \cdot L^3$	–	1,0579
	$A = 0,49 + 0,765 \cdot 10^{-4} \cdot L - 0,301 \cdot 10^{-9} \cdot L^2$	–	1,0687
	с системой смазки		
	$A = 0,585 \cdot 10^{-2} - 0,733 \cdot \ln(L+1) + 0,0879 \cdot \ln^2(L+1)$	–	1,2107
	$A = 0,744 \cdot 10^{-4} \cdot L - 0,674 \cdot 10^{-9} \cdot L^2 + 0,246 \cdot 10^{-14} \cdot L^3$	–	1,2113
	$A = 0,186 + 0,651 \cdot 10^{-4} \cdot L - 0,547 \cdot 10^{-9} \cdot L^2 + 0,195 \cdot 10^{-14} \cdot L^3$	–	1,2118
	$A = 0,4 + 0,432 \cdot 10^{-4} \cdot L - 0,14 \cdot 10^{-9} \cdot L^2$	–	1,2163

Результаты расчётов показали, что интенсивность стирания гребней ( $A$ ) колёсных пар локомотивов почти в два раза больше, чем интенсивность стирания бандажей ( $i$ ). Следовательно, интенсивность стирания гребней определяет межремонтный период бандажей колёсных пар.

Эксперимент показал, что данная система смазки гребней не влияет на интенсивность износа бандажа ( $i$ ), а значит, лубрикатор наносится точно на назначенное место на гребне.

Из полученных зависимостей видно, что износ бандажей формируется с одинаковой интенсивностью на всех этапах эксплуатации, а гребень интенсивнее стирается в начале эксплуатации до 30000 – 40000 км, пока профиль бандажа не приобретает формы головки рельса. Затем – интенсивность стирания гребня уменьшается и опять начинает возрастать с 150000 км.

По полученным функциям можно прогнозировать, что обточка колёсных пар из-за стирания гребня потребуется после пробега 160000 км с начала эксплуатации без применения лубрикаторов и после 205000 км при смонтированной системе смазки гребней. Следовательно,

можно утверждать, что, применяя систему смазки гребней, можно увеличить работоспособность колёсной пары не менее чем в 1,3 раза.

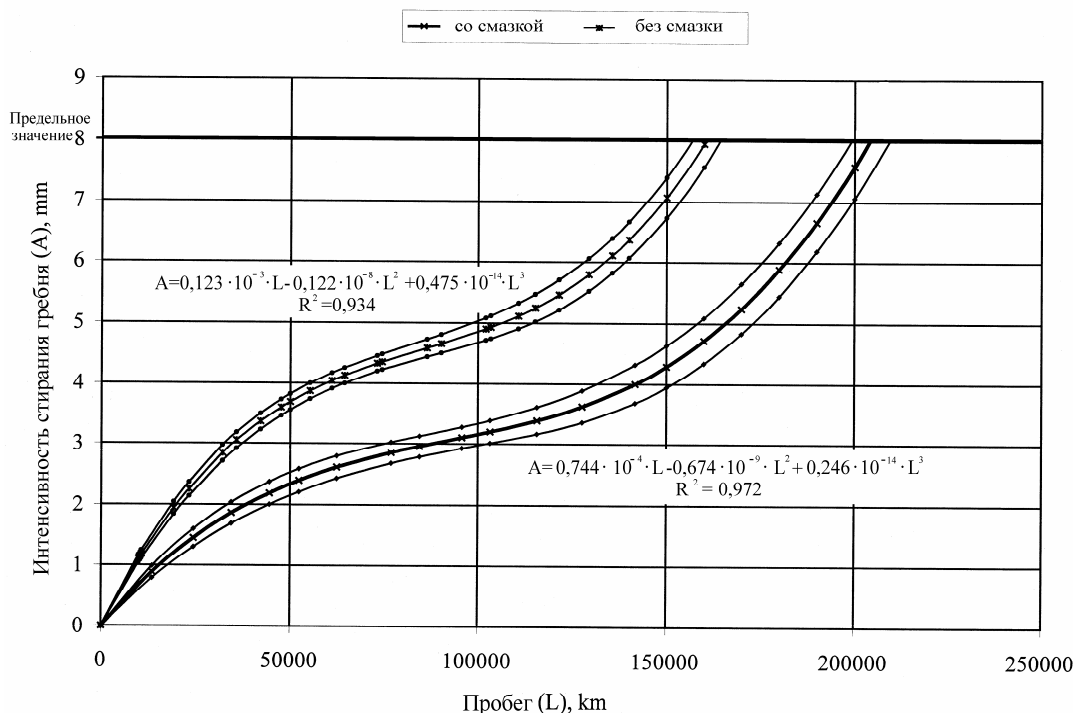


Рис.2. Зависимость интенсивности стирания гребня от пробега

### 3. ПРОВЕРКА УСТОЙЧИВОСТИ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ

В стохастических процессах повторение эксперимента всегда приводит к новым результатам, отличающимся от исходных. Соответственно, математические модели, описывающие исследуемые характеристики, а тем более их прогнозные модели, будут несколько иными. Прогнозная модель определяется не только как зависимость, наилучшим образом математически описывающая статистические данные (в нашем случае, дающая наименьшее стандартное отклонение), но и как учитывающая также мнения специалистов-экспертов о приемлемости модели. Однако выбранная модель будет пригодна для прогнозирования только в том случае, если она устойчива к случайным, но возможным колебаниям исходных данных.

Устойчивость модели легко проверяется применением метода имитационного моделирования. Значения исследуемых случайных величин в зависимости от типа их вероятностного распределения имитируются достаточно большое количество раз в интервалах их возможных изменений. На основе полученных случайных значений рассчитываются параметры прогнозной модели выбранного типа и по ней осуществляются прогнозные расчёты. Модель будет устойчива к случайным колебаниям данных, если прогнозные значения не выходят за границы рассчитанных ранее прогнозных доверительных интервалов соответствующей модели.

В нашем случае измеряемые случайные характеристики  $A$  – износ гребня колеса и  $i$  – интенсивность износа бандажа распределены по нормальному закону, что подтвердила проверка гипотезы об нормальности их распределений по критерию Пирсона  $\chi^2$ . Параметры нормального распределения (средние значения и средние квадратические отклонения) для характеристики  $A$  брались из табл.2 (аналогичные параметры использовались и для характеристики  $i$ ).

Используя стандартную программу получения случайных чисел, равномерно распределённых в интервале  $[0,1]$ , вычислялось случайное значение  $\hat{A}$  износа  $A$ , нормально распределённое с параметрами  $\bar{A}$  и  $\sigma_A$ , где  $\bar{A}$  – среднее значение  $A$ , а  $\sigma_A$  – соответствующее среднеквадратическое отклонение.

Величина  $\tilde{A}$  вычислялась по формуле [8]:

$$\tilde{A} = \bar{A} + \sigma_A \cdot \frac{x - \frac{n}{2}}{\sqrt{\frac{n}{12}}}, \quad (3)$$

где  $x$  – сумма  $n$  случайных чисел, равномерно распределенных в интервале  $[0,1]$ .

Необходимое количество имитаций определялось экспериментально и считалось достаточным, если их увеличение не изменяло рассчитываемых границ доверительных интервалов для выбранной модели.

Исследования показали, что кубические параболы, дающие наименьшее стандартное отклонение, не устойчивы к вариациям исходных данных и могут быть использованы в прогнозировании лишь для очень малых прогнозных интервалов, в то время как парабола, логарифмическая зависимость и прямая линия оказались устойчивыми к случайным изменениям переменных модели.

## ВЫВОДЫ

Исследования показали, что:

1. Интенсивность стирания гребней колёсных пар локомотивов почти в два раза больше, чем интенсивность стирания бандажей, поэтому интенсивность стирания гребней определяет межремонтный период бандажей колёсных пар.
2. Можно прогнозировать, что обточка колёсных пар из-за стирания гребня потребует после пробега  $160000 \pm 3000$  км с начала эксплуатации без применения лубрикаторов и после  $205000 \pm 4000$  км при смонтированной системе смазки гребней.
3. Система смазки гребней позволяет увеличить работоспособность колёсной пары до обточки не менее чем на 31%.
4. Применение метода имитационного моделирования позволило выявить модели, устойчивые к возможным колебаниям исходных данных и наиболее пригодных для прогнозирования.

## Литература

- [1] Курасов Д. А. *Повышение долговечности бандажей колесных пар подвижного состава*. Москва: Транспорт, 1981. 160 с.
- [2] D. G. Grieve, R. S. Dwyer-Joyce, J. H. Beynon. Abrasive wear of railway track by solid contaminant, *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2001, Vol. 215, pp. 193–205.
- [3] A. Moreau. Characteristics of wheel/rail contact, *Rail Engineering. International Edition*, 1992. №3, pp.15–22.
- [4] Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. *Математические методы в теории надежности*. Москва: Наука, 1965. 367 с.
- [5] Аладьев В. З., Богдвичюс М. А. *Maple 6: Решение математических, статистических и инженерно-физических задач*. Москва: Лаборатория базовых знаний, 2001. 824 с.
- [6] *Инструкция по формированию, ремонту и осмоту колёсных пар тягового подвижного состава колеи 1520 мм*. Вильнюс: LG, 1999. 129 с.
- [7] Дрейпер Н., Смит Г. *Прикладной регрессионный анализ*. Москва: Статистика, 1973. 392 с.
- [8] Хэмди А. Таха. *Введение в исследование операций*. Москва: Вильямс, 2001.