

А. А. Босов, П. А. Лоза

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЦИОНАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ



А. А. БОСОВ

П. А. ЛОЗА

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
РАЦИОНАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ  
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Монография

Днепропетровск 2015

УДК 629.488

ББК 39.22-08

Б 85

ISBN 978-966-2394-15-3

Издательство ООО предприятие «Дриант»

Днепропетровск, 2015

Рецензенты:

**Гетьман Г.К.** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры «Электроподвижной состав железных дорог» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В.Лазаряна.

**Капица М.И.** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры «Локомотивы» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В.Лазаряна.

**Кравец В.В.** – доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Государственного высшего учебного заведения «Национальный горный университет».

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЦИОНАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Б 85 БОСОВ А. А., ЛОЗА П. А.: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
РАЦИОНАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ: Монография / А.А. Босов, П.А. Лоза – Дн-ск: Изд-  
во ООО предприятие «Дриант», 2015-252 с.- ISBN 978-966-2394-15-3

УДК 629.488

ББК 39.22-08

В предлагаемой монографии рассматриваются теоретические основы влияния ремонтных воздействий на надежность технических объектов. В основу теории положен оператор восстановления, как математическая модель ремонтного воздействия. Данный подход позволил естественным образом учитывать технологию ремонта и определять экономические показатели системы содержания. Сформулирован ряд задач по определению рационального содержания. Предложенный подход применен как для отдельных элементов подвижного состава, так и для объектов в целом.

Монография предназначена для научных сотрудников и инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, изучением и обследованием подвижного состава. Может быть полезной для преподавателей и студентов высшей школы.

© Босов А.А., Лоза П.А., 2015

© Издательство ООО предприятие «Дриант»  
Днепропетровск, 2015

ISBN 978-966-2394-15-3

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>1. <math>\lambda</math>-,<math>H</math>-ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.....</b>  | <b>8</b>  |
| 1.1 Основные понятия.....  | 8         |
| 1.2 Математическая модель наработки до отказа.....   | 10        |
| 1.3. Средняя наработка до первого отказа.....  | 14        |
| 1.4. $\lambda$ -характеристика восстанавливаемого объекта .....  | 15        |
| 1.5. Взаимосвязь между $\lambda$ - и $H$ -характеристиками .....   | 18        |
| <b>2. АКСИОМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ<br/>МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ<br/>(РЕМОНТА) ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА.....</b> | <b>30</b> |
| 2.1.Основные понятия математической теории восстановления.....   | 30        |
| 2.2. Аксиомы, определяющие модель восстановления.....  | 33        |
| 2.3. Объекты с линейными $\lambda$ -характеристиками.....  | 39        |
| 2.4. Модель чистого сдвига .....   | 43        |
| 2.5. Алгоритм построения СПВ.....  | 47        |
| <b>3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ<br/>ПЛАНОВЫХ ВОССТАНОВЛЕНИЙ (СПВ).....</b>  | <b>53</b> |
| 3.1.Технологическая карта (ТЭК).....   | 53        |
| 3.2. Расчет затрат средств и времени при заданной СПВ .....  | 61        |
| 3.3. Математическая постановка задачи определения<br>рациональной системы плановых восстановлений .....                        | 70        |
| 3.4. Исследование существования решения задачи определения<br>рациональной системы плановых восстановлений .....               | 76        |
| 3.5. Алгоритм решения задачи $A_2$ .....   | 81        |
| 3.6. Система плановых восстановлений с частичным<br>восстановлением элементов (СПВЧ) .....                                     | 87        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>4. ИНФОРМАЦИОННОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ<br/>ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНОЙ<br/>СИСТЕМЫ ПЛАНОВЫХ ВОССТАНОВЛЕНИЙ.....</b> | <b>96</b>  |
| 4.1. Инженерно-экономическая информация.....   | 96         |
| 4.2. $\lambda$ -характеристика элементов с постепенным отказом.....  | 101        |
| 4.3. $\lambda$ -характеристика элементов с внезапными отказами.....  | 124        |
| <b>5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СПВ ДЛЯ<br/>НЕКОТОРЫХ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО<br/>ТРАНСПОРТА.....</b>                         | <b>146</b> |
| 5.1. Расчет рациональной периодичности контроля и обточки<br>бандажей колесных пар локомотива.....                             | 146        |
| 5.2. Определение рациональной плановой системы восстановления<br>двигателей ДТ-9Н тяговых агрегатов .....                      | 156        |
| 5.2.1. Анализ условий эксплуатации. Выбор независимой<br>переменной в качестве наработки .....                                 | 156        |
| 5.2.2. Анализ отказов тяговых двигателей .....   | 159        |
| 5.2.3. $H$ -характеристики тягового двигателя ДТ-9Н .....  | 162        |
| 5.2.4. Технологическо-экономическая карта ремонта тягового двигателя<br>ДТ-9Н .....  | 165        |
| 5.2.5. Определение начального приближения к рациональным<br>периодам планового восстановления элементов ДТ-9Н.....             | 173        |
| 5.2.6. Определение рациональных периодов планового<br>восстановления с учетом технологии ремонта ДТ-9Н.....                    | 176        |
| 5.2.7. Исследование влияния веса поезда на систему плановых<br>восстановлений.....   | 179        |
| 5.3. Определение рациональной СПВ и потребного парка тяговых<br>агрегатов.....   | 183        |
| 5.3.1. Общая схема работы железнодорожного транспорта ГОКа   | 183        |

|   |     |
|---|-----|
| 5.3.2. Инженерная постановка задачи определения рациональной спл<br>и потребного парка локомотивов (на примере тяговых агрегатов) | 185 |
| 5.3.3 Математическая постановка задачи .....  | 186 |
| 5.3.4 Численные результаты решения задачи на примере<br>Соколово-Сарбайского горнообогатительного комбината .....                 | 188 |

## **6. СИСТЕМА СОДЕРЖАНИЯ С УЧЕТОМ**

|   |            |
|---|------------|
| <b>ДИАГНОСТИРОВАНИЯ .....</b>   | <b>189</b> |
| 6.1. Определение влияния диагностирования элемента локомотива<br>на его надежность .....          | 189        |
| 6.2. Монотонные процессы износа и "старения" элементов ТПС .                                      | 204        |
| 6.3. Моделирование рациональных периодов диагностирования ТПС<br>при неразрушающем контроле ..... | 211        |
| 6.4. Определение параметров бортовой системы диагностирования<br>ТПС .....                        | 223        |
| 6.5. Оценка влияния стационарного диагностирования на<br>надежность ТПС .....                     | 235        |
| <b>Список использованных источников .....</b>   | <b>241</b> |

## **ВВЕДЕНИЕ**

Содержание жилища, мостов, дорог и т.д. было всегда актуальным во все времена существования человечества.

Работы по содержанию жилища и, например, мостов существенно отличались друг от друга. И только с созданием теории вероятностей появились теоретические возможности описания ремонтных воздействий на работоспособность технических объектов.

Впервые процесс восстановления технического объекта был описан В.Феллером в предположении полного восстановления. Это позволило получить классическое уравнение восстановления, связывающее среднее количество отказов и функцию распределения вероятностей наработки до отказа.

Значительный прогресс в моделировании ремонтных воздействий был достигнут, когда начали рассматривать полумарковские процессы.

В этом плане необходимо отметить работы В.С. Королюка и его школы, а так же исследования в области надежности Б.В. Гнеденко, который вместе со своими учениками издали монографию «Математические методы в теории надежности». Из зарубежных исследований в теории восстановления необходимо отметить монографию Кокса Д. и Смита В.

Существенным недостатком исследований по надежности было то, что при построении вероятностных характеристик необходимо было проводить предварительно специальные планы экспериментов.

И возникла необходимость по результатам эксплуатации технического объекта и системы содержания отсеять влияние системы содержания.

Данная возможность возникла, когда ремонтные воздействия стали моделировать некоторым оператором восстановления, зависящим от наработки, при которой выполняются ремонтные воздействия и от объема ремонта.

Подобный подход естественным образом учитывает технологию ремонта и позволяет строить обратный оператор, действие которого аннулирует воздействия исходного и тем самым определять характеристику надежности технического объекта, которую ранее можно было получать в условиях специального эксперимента.

В предлагаемой работе в качестве характеристики принята интенсивность отказов, на которую действует оператор ремонта.

Выполняя вариацию наработок и объемов ремонта, получаем возможность воздействовать на поток отказов, а с учетом затрат средств и времени на ремонтные воздействия определять их рациональность в зависимости от объемов работы технического объекта.

Авторы считают своим долгом отметить стимулирование работы в данном направлении доцента кафедры электроподвижного состава ДИИТа Курасова Д.А., к.т.н. главного инженера депо Киев – Пассажирский Дроздова А.А. и д.т.н. профессора Браташа В.А. в исследовании надежности тяговых агрегатов, изготовлявшихся на Днепропетровском электровозостроительном заводе.

Особую благодарность авторы выражают А.В. Гридасовой за её труд по набору и редактированию данной монографии.



# 1. $\lambda$ - $H$ -ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

## 1.1 Основные понятия

Состояние технического объекта в любой момент времени можно описать совокупностью параметров  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , и так как они изменяются во времени, то в дальнейшем будем считать, что эти параметры являются функциями времени.

Однако для многих технических объектов железнодорожного транспорта зависимость указанных параметров от времени не является характерной. Например, если рассматривать локомотив (тепловоз или электровоз) как технический объект, то состояние его параметров естественно изучать в зависимости не от времени, а от пробега. Поэтому введем в рассмотрение такое понятие как наработка, а количественное ее значение будем обозначать символом  $t$ , оговаривая в каждом конкретном случае её инженерно-физический смысл.

Следующим важным понятием является понятие отказа технического объекта, когда нарушается его работоспособность, и он не в состоянии выполнять возложенные на него функции.

В общем случае, в пространстве возможных значений параметров технического объекта, обозначенном через  $E_n$  ( $n$  – количество параметров), выделяется некоторая область  $X \subset E_n$ , являющаяся совокупностью таких параметров, при которых технический объект работоспособен. Если при некоторой наработке  $t$  изображающая точка  $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$  принадлежит области  $X$ , то говорят, что объект работоспособен. Следовательно, запись  $x(t) \in X$  означает, что объект

работоспособен, а  $x(t) \notin X$  – объект неработоспособен или произошел отказ.

Эту формализацию можно рассматривать как обобщенную математическую модель отказа.

Пусть после изготовления (или после капитального восстановления) объект является работоспособным и его состояние описывается вектором  $x(0) = (x_1(0), x_2(0), \dots, x_n(0)) \in X$ . Однако, в процессе работы параметры изменяются и при некоторой наработке  $t_1$  происходит первый выход точки  $x(t_1)$  из области  $X$ ; тогда, наработка  $t_1$  представляет собой наработку до отказа. Необходимо отметить, что численное значение наработки до отказа ( $t_1$ ) существенно зависит прежде всего от начального состояния технического объекта  $x(0)$  и от того, как изменяются параметры от наработки  $t$  (другими словами, от условий эксплуатации). Последнее можно пояснить следующим примером. Если объект – локомотив, который используется для тяги поезда весом  $Q$ , то для этого локомотива наработка до отказа есть некоторая функция от  $Q$ . Очевидно, что чем больше вес поезда, тем интенсивнее происходит износ его элементов, что приводит к уменьшению пробега (наработки) до отказа.

Обозначая через  $\Sigma$  совокупность условий, при которых происходит эксплуатация объекта, мы должны отметить, что изображающая точка состояний объекта  $x$  зависит и от  $\Sigma$ , т.е.  $x = x(t, \Sigma)$ . Раскрытие этой зависимости от наработки  $t$  и условий эксплуатации  $\Sigma$  представляет собой очень важную задачу той или иной прикладной науки. При решении этой задачи приходится сталкиваться со следующими обстоятельствами:

– во-первых, начальное значение вектора состояний  $x(0)$  является неопределенным или, в лучшем случае, известно с определенной точностью;

– во-вторых, условия эксплуатации  $\Sigma$  непостоянны, а порой изменяются непредсказуемым образом (температура, влажность окружающей среды и т.д.);

– в-третьих, для описания  $x(t)$  необходимо привлекать значительное число физико-химических, а иногда и социальных процессов, что приводит к необозримости задачи;

– в-четвертых, приходится рассматривать не один, а некоторый парк технических объектов (хотя и однотипных).

В силу перечисленных обстоятельств, традиционные методы физики, химии и т.д. для решения задач теории надежности, как правило, становятся неприемлемыми из-за значительного числа всевозможных неопределенностей и размерности задачи. Поэтому в большинстве случаев для решения таких задач используются методы теории вероятностей и математической статистики [1].

## **1.2 Математическая модель наработки до отказа**

Перечисленные причины практической неразрешимости задачи определения наработки технического объекта до отказа приводят к необходимости использования моделей теории вероятностей.

Так как наработка до отказа для каждого объекта является существенно неопределенной величиной, то в качестве описывающей ее математической модели возьмем случайную величину, которую обозначим символом  $\xi$ . Необходимо отметить еще раз, что  $\xi$  является математическим объектом, который используется для описания

неопределенной величины – наработки технического объекта до отказа. В этом плане выражение «наработка технического объекта до отказа является случайной величиной» должно пониматься только и только как тот факт, что используется математический объект – случайная величина для описания реальных наработок технического объекта до отказа и не более. Насколько применение такой модели целесообразно, выходит за рамки данной работы и может быть проверено только опытом.

Не вдаваясь в математические подробности теории вероятностей [2], напомним основные количественные характеристики, которые будем использовать для описания случайной величины  $\xi$ .

Пусть  $t$  некоторая детерминированная величина, тогда соотношение  $\{\xi < t\}$  необходимо рассматривать как случайное событие, вероятность которого обозначим через  $F(t)$ . Так как по физическому смыслу  $\xi \geq 0$ , то функция  $F(t)$  определена для неотрицательных значений  $t$  и равна нулю при  $t < 0$ , т.к.  $\{\xi < 0\}$  невозможное событие. Функция  $F(t)$  является исчерпывающей количественной характеристикой случайной величины  $\xi$ , с этой функцией будем рассматривать

$$P(t) = 1 - F(t) \quad (1.1)$$

Используя терминологию теории надежности, функция  $P(t)$  представляет собой вероятность безотказной работы технического объекта за наработку  $t$ .

В большинстве случаев, приемлемых с точки зрения приложения к реальным техническим объектам, можно считать, что функция  $F(t)$  дифференцируема. В этих случаях вводят еще одну количественную характеристику

$$\lambda(t) \triangleq \frac{F'(t)}{1 - F(t)}, \quad (1.2)$$

которую для краткости будем называть  $\lambda$ -характеристикой технического объекта (или интенсивность отказов [3]). Из соотношения (1.2) через  $\lambda$ -характеристику функция  $F(t)$  определяется следующим образом

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right\}, \quad (1.3)$$

в предположении, что  $F(0) = 0$ . С инженерной точки зрения условие  $F(0) = 0$  означает, что в момент запуска технический объект работоспособен и не откажет.

Используя (1.3) и (1.1) для вероятности безотказной работы получаем

$$P(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right\}. \quad (1.4)$$

В заключение данного подраздела приведем ставший уже классическим рисунок, отражающий зависимость  $\lambda(t)$  от наработки

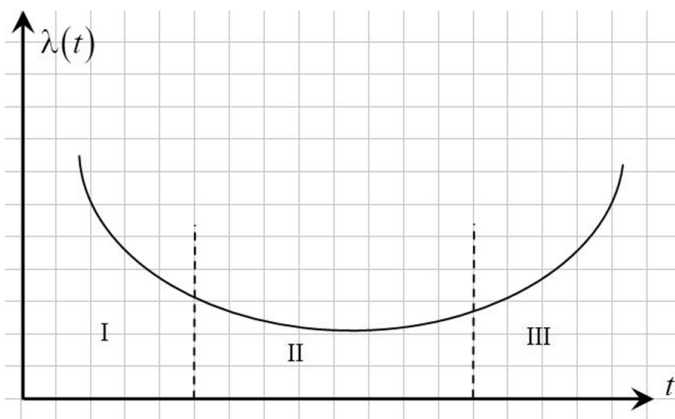


Рисунок 1.1

Принято выделять три зоны: I — зона «выжигания дефектов» или зона приработки; II — зона нормального функционирования объекта; III — зона «старения» объекта, когда в объекте происходят необратимые физико-химические процессы и наблюдается увеличение интенсивности

отказов. В реальных ситуациях может отсутствовать та или иная зона, а  $\lambda$ -характеристика, получаемая из опытных данных, может иметь и более экзотический вид. Другими словами на рис. 1.1 представлена определенная идеализация, которая поясняет только качественный характер, поэтому модель, представленная на рис. 1.2, так же отражает качественный характер в отдельных случаях и более удобна в использовании для расчетов.

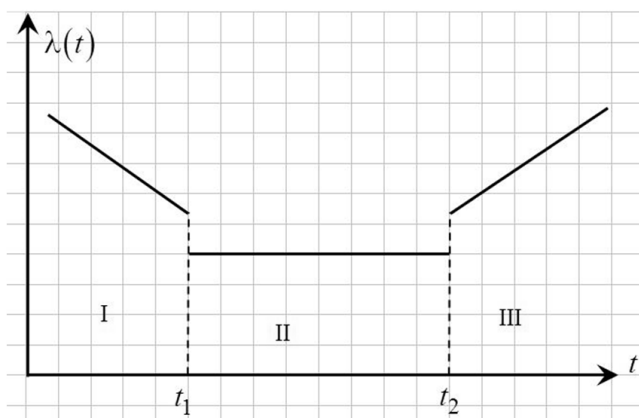


Рисунок 1.2

Исходя из физического смысла  $\lambda$ -характеристики, который заключается в том, что при  $t \geq 0$ ,  $\lambda(\tau) \geq 0$ , необходимо на параметры модели (рис. 1.2) наложить соответствующие ограничения. В общем виде данную модель можно аналитически описать формулой

$$\lambda(\tau) = \begin{cases} 2a_1(t_1 - t) + b_1 \text{ нпу } 0 \leq t < t_1; \\ b_2 \text{ нпу } t_1 \leq t < t_2; \\ 2a_3(t - t_2) + b_3 \text{ нпу } t_2 \leq t. \end{cases} \quad (1.5)$$

Тогда семь параметров, входящих в описание (1.5), должны удовлетворять условиям

$$a_1, b_1, b_2, a_3, b_3 \geq 0; 0 \leq t_1 \leq t_2. \quad (1.6)$$

### 1.3. Средняя наработка до первого отказа

Под средней наработкой технического объекта до первого отказа  $T_1$ , будем понимать математическое ожидание случайной величины  $\xi$  и вычислять по формуле [1]:

$$T_1 = \int_0^{\infty} t F'(t) dt$$

или

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.7)$$

Используя аналитическое описание  $\lambda(t)$ , данное формулой (1.5), и подставляя в (1.4), а затем в (1.7), получим

$$T_1 = \int_0^{t_1} e^{-\Lambda_1(t)} dt + \int_{t_1}^{t_2} e^{-\Lambda_2(t)} dt + \int_{t_2}^{\infty} e^{-\Lambda_3(t)} dt,$$

где

$$\begin{aligned} \Lambda_1(t) &= a_1(2t_1t - t^2) + b_1t; \\ \Lambda_2(t) &= b_2(t - t_1) + \Lambda_1(t); \\ \Lambda_3(t) &= a_3(t - t_2)^2 + b_3(t - t_2) + \Lambda_2(t). \end{aligned}$$

После элементарных преобразований имеем

$$\begin{aligned} T_1 &= e^{a_1 \left( t_1 + \frac{b_1}{2a_1} \right)^2} \int_{\frac{b_1}{2a_1}}^{t_1 + \frac{b_1}{2a_1}} e^{a_1 x^2} dx + e^{-\Lambda_1(t_1)} \frac{1}{b_2} \left( 1 - e^{-b_2(t_2 - t_1)} \right) + \\ &+ e^{\frac{b_3^2}{4a_3} - \Lambda_2(t_2)} \sqrt{\frac{\pi}{a_3}} \left( \frac{1}{2} - \Phi \left( \frac{b_3}{\sqrt{2a_3}} \right) \right), \end{aligned} \quad (1.8)$$

где

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Если зоной приработки можно пренебречь, т.е. считать, что  $t_1 = 0$ , тогда формула (1.8) принимает вид

$$T_1 = \frac{1}{b_2} \left( 1 - e^{-b_2 t_2} \right) + e^{\frac{b_3^2}{4a_3} - b_2 t_2} \sqrt{\frac{\pi}{a_3}} \left( \frac{1}{2} \Phi \left( \frac{b_3}{\sqrt{2a_3}} \right) \right), \quad (1.8')$$

а в ситуациях, когда отсутствует и II -я зона, положив  $t_2 = 0$ , приходим к следующей формуле

$$T_1 = e^{\frac{b_3^2}{4a_3}} \sqrt{\frac{\pi}{a_3}} \left( \frac{1}{2} \Phi \left( \frac{b_3}{\sqrt{2a_3}} \right) \right). \quad (1.8'')$$

Устремляя  $a_3$  к нулю, из выражения (1.8'') для средней наработки до первого отказа получаем  $T_1 = \frac{1}{b_3}$ , что легко получить и непосредственно из (1.7), так как в этом случае закон распределения  $F(t)$  является экспоненциальным с параметром  $b_3$ .

#### 1.4. $\lambda$ -характеристика восстанавливаемого объекта

Пусть через наработку  $\tau$  над объектом производится полное восстановление, тогда интенсивность отказов будет периодической функцией с периодом  $\tau$  и запишется следующим образом

$$\lambda(t; \tau) = \lambda \left( t - \tau \left[ \frac{t}{\tau} \right] \right), \quad (1.9)$$

где  $\left[ \frac{t}{\tau} \right]$  целая часть отношения  $\frac{t}{\tau}$ .



## Список использованных источников

1. Гниденко В.В. Математические методы в теории надежности / В.В. Гниденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьёв. – М.: «Наука», 1965 – 524 с.
2. Колмогоров А.И. Основные понятия теории вероятностей / А.И. Колмогоров – М.: «Наука», 1975, с. 119.
3. Надежность в технике. Термины и определения. ГОСТ 13377- 75, М., 1975, с. 21.
4. Гнеденко Б.В. Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н.Коваленко – М.: «Наука», 1966, 431 с.
5. Босов А.А. Прогнозирование эффективности технологических мероприятий по увеличению коммутационной надежности тяговых двигателей. В кн.: «Вопросы оптимизации содержания электроподвижного состава» / А.А Босов., Д.А.Курасов // Труды ДИИТа, вып. 134, Днепропетровск, 1972, с. 156-165.
6. Кокс Д. Теория восстановления / Д.Кокс, В.Смит – М.: «Советское радио», 1967, 299 с.
7. Беллман Р. Дифференциально-разностные уравнения / Р. Беллман, К. Кук – М.: «Мир», 1967, 548 с.
8. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн – М.: «Наука», 1973, 620 с.
9. Тэллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения / В. Тэллер – М.: ИЛ, 1952, 752 с.
10. Козлов Б. А. Справочник по расчету надёжности / Б. А. Козлов, И.А. Ушаков – М.: «Советское радио», 1975, 471 с.

11. Королюк В.С. Время пребывания полумарковского процесса в фиксированном множестве состояний / В.С. Королюк – «Укр. мат. журн.», 1975, IX, №3, с. 364-368.
12. Герцбах И.Б. Модели профилактики / И.Б. Герцбах – М.: «Советское радио», 1969, 214 с.
13. Демьянчук В.С. Надежность обслуживаемых радиоэлектронных систем / В.С. Демьянчук, С.М. Броди – Киев: «Вища школа», 1976, 160 с.
14. Босов А.А. Аксиоматическое построение теории восстановления. В кн. «Оценка характеристик качества сложных систем и системный анализ" / А.А. Босов // Тезисы докладов VIII межведомственного (1 всесоюзного) научно-технического семинара – М., 1978, с. 224-225.
15. Босов А.А. Аксиоматическое построение математической модели восстановления / А.А. Босов // Вестник ХГУ №174 «Прикладная математика и механика», вып. 43, 1978, с. 50-55.
16. Пиявский Р.С. Исследование твердости железных покрытий, осаждаемых на постоянном токе в холодном хлористом электролите / Р.С. Пиявский – «Укр. хим. журн.», 1978, т.44, №11, с. 1157-1161.
17. Колмогоров А.Н. Элементы теории функций функционального анализа / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин – М.: «Наука», 1972, 496 с.
18. Егоров И.П. О математических структурах / И.П. Егоров – М.: «Знание», серия «Математика, кибернетика», №5, 1976, 64 с.
19. Виноградов Г.М. Основы теории чисел / Г.М. Виноградов – М.: «Наука», 1972, 167 с.
20. Михелович Ш.Х. Теория чисел / Ш.Х. Михелович – М.: «Высшая школа», 1962, 259 с.
21. Ушакова И.А. Оптимальные задачи надежности / под ред. Ушакова И.А. – М.: Изд-во комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1968, 292 с.

22. Герцбах И.Б. Модели отказов / И.Б. Герцбах, Х.Б. Кордонский – М.: «Советское радио», 1966, 166 с.
23. Кульбак Л.И. Основы расчета обеспечения электронной аппаратуры запасными элементами / Кульбак Л.И. – М.: «Советское радио», 1970, 207 с.
24. Михайлов А.В. Эксплуатационные допуски и надежность в радиоэлектронной аппаратуре / А.В. Михайлов – М.: «Советское радио», 1970, 215 с.
25. Кузьмин Ф.И. Задачи и методы оптимизации показателей надежности / Ф.И. Кузьмин – М.: «Советское радио», 1972, 224 с.
26. Райкин А.Л. Элементы теории надежности для проектирования технических систем / А.Л. Райкин – М.: «Советское радио», 1976, 264 с.
27. Райкин А.Л. Вероятностные модели функционирования резервированных устройств / А.Л. Райкин – М.: «Наука», 1971, 215 с.
28. Барлоу Р. Математическая теория Надежности / Р.Барлоу, Ф.Прошан – М.: «Советское радио», 1969, 460 с.
29. Беляев В.А. Анализ системы и организации ремонта электровозов и тепловозов / В.А. Беляев – Труды "ВНИИЖТа", Трансжелдориздат 1958, вып. 155.
30. Рахматулин М.Д. Методика определения сроков межремонтной работы тепловозов / М.Д. Рахматулин – М.: Труды ЛИИЖТа, Трансжелдориздат, 1960, вып. 130.
31. Исаев И.П. Проблемы повышения надежности технических устройств железнодорожного транспорта / И.П. Исаев – М.: «Транспорт», 1968.
32. Павлович Е.С. Основы расчета надежности и технико-экономической эффективности тепловозных дизелей / Е.С. Павлович – Омск: Труды ОМНИИЖТа, 1968, т. 87, ч. II.

33. Алехин С.В. Надежность механической части подвижного состава / С.В. Алехин, Н.Г. Продан – М.: «Транспорт», 1969.
34. Виноградова Ю.Н. Повышение надежности и срока службы электровозов / Под общ. ред. Ю.Н. Виноградова Труды ВНИИЖТа – М.: «Транспорт», 1969, вып. 386.
35. Исаев И.П., Журавлев С.Н., Седов В.И. Разработка оптимальной системы ремонта локомотивов / И.П. Исаев, С.Н. Журавлев, В.И. Седов – «Железнодорожный транспорт», 1970, № 10.
36. Кабенина Н.Г. Повышение надежности и межремонтного ресурса электроподвижного состава / Под ред. Кабенина Н.Г. Труды ВНИИЖТа – М.: «Транспорт», 1971. вып. 441.
37. Исследование надежности дизельного подвижного состава. – Омск: Труды ОМИИТа, 1972, т.132 вып.2.
38. Горский А.В. Определение оптимальных сроков проведения планово-предупредительного ремонта элементов э.п.с. на основе информации о параметре потока отказов / А.В. Горский – Труды МИИТа, 1972, вып. 405.
39. Абдукаримов А.А. Особенности оптимизации межремонтных сроков маневровых тепловозов / А.А. Абдукаримов, В.А. Четвергов, Г.В. Шатунов – ОММИТа, 1973, вып. 145, с. 19-25.
40. Босов А.А. Расчет оптимально надежности тяговых агрегатов ПЭ–2М / А.А. Босов, В.З. Глейзер, Ю.С. Ожигов – «Пром. транспорт», №3, 1973.
41. Вознюк В.Н. Определение периодичности и объемов работ по осмотру и ремонту экспортных тепловозов / В.Н. Вознюк – Тр. ВНИТИ, 1973, вып. 38, с. 21-25.
42. Виноградов Ю.Н. Сроки службы магистральных электровозов и периодичность их ремонта / Ю.Н. Виноградов – Тр. ВНИИ ж.д. транспорт, 1974, вып. 516, с. 155-162.

43. Малоземов Н.А. Вопросы надежности и повышения эффективности эксплуатации и ремонта подвижного состава / Н.А. Малоземов – Тр. РИЖТа, 1974, вып. 105, с. 199.
44. Босов А.А. Теоретические основы оптимального управления процессом восстановления. «Повышение эксплуатационной надежности локомотивов в условиях дорог Урала и Сибири» / А.А. Босов // Материалы сетевой научно-технической конференции – Омск: 1973, с. 308–311.
45. Исаев И.П. Методика анализа процесса изнашивания деталей электроподвижного состава для определения сроков их ремонта / И.П. Исаев, А.В. Горский, В.А. Козырев – «Надежность и контроль качества», №11, 1976.
46. Исаев И.П. Принцип определения оптимальной структуры ремонтного цикла электроподвижного состава / И.П. Исаев, А.В. Горский, В.А. Козырев – Рукопись деп. ЦНИИТЭИ МПС, №1491 –1980, с. 13.
47. Босов А.А. Определение рациональной системы содержания технических объектов при кусочно-линейной аппроксимации  $H$ -характеристики / А.А. Босов, Г.И. Семинец – Рукопись деп. ЦНИИТЭИ МПС, №1410– 79, м, 1979, с. 17.
48. Ожигов Ю.С. Определение ущерба, вызванного неисправностью электровоза / Ю.С. Ожигов, В.З. Глейзер – «Пром. транспорт», №3, 1976.
49. Босов А.А. Рациональное восстановление электроаппаратов агрегата ПЭ–2М / А.А. Босов, В.В. Соловьев – «Пром. транспорт», №6, 1977.
50. Босов А.А. Прогнозирование износа бандажей колесных пар и определение рациональной периодичности их обточки. В кн.: «Вопросы оптимизации электроподвижного состава» / А.А. Босов,

- А.А. Дроздов, Д.А. Курасов – Труды ДИИТа, вып. 134. Днепропетровск, 1972, с. 137-146.
51. Босов А.А. Методические указания по курсу «Теория надежности и планирование эксперимента» / А.А. Босов – Днепропетровск, 1979, 50 с.
52. Босов А.А. Определение рациональной системы содержания элементов тяговых агрегатов. В кн.: «Прочность и надежность технических устройств» / А.А. Босов, А.Г. Хандрига – Киев: «Наукова Думка», 1981, с. 109-116.
53. Босов А.А. О рациональном содержании технических объектов. Материалы 11-й республиканской конференции «Вычислительная математика в современном научно-техническом прогрессе», Киев, 1978.
54. Босов А.А. Оптимальное управление процессом восстановления в одной задаче теории надежности. Материалы II-го Всесоюзного семинара. «Численные методы нелинейного программирования», Харьков, 1976.
55. Дубровин Ю.Ф. Вероятные принципы управления процессом восстановления выпрямительных установок электровозов. Автореферат дис. на соиск. учен. степени канд. тех. наук №05.22.07. Днепропетровск, 1975, с. 29.
56. Зангвилл У.Е. Нелинейное программирование / У.Е. Зангвилл – М.: «Советское радио», 1973, 311 с.
57. Моисеев Н.Н. Методы оптимизации / Н.Н. Моисеев, Ю.П. Иванилов, Е.М. Столярова – М.: «Наука», 1978, 351 с.
58. Дуб Дж.Л. Вероятностные процессы / Дж.Л. Дуб – М.: ИЛ, 1959.
59. Гихман И.И. Теория случайных процессов. т.1 / И.И. Гихман, А.В. Скороход – М.: «Наука», 1971, 664 с.

60. Карлин С. Основы теории случайных процессов / С. Карлин – М.: «Мир», 1971, 536 с.
61. Баруча-Рид А.Т. Элементы теории Марковских процессов и их приложения / А.Т. Баруча-Рид – М.: «Наука», 1969, 512 с.
62. Розанов Ю.А. Случайные процессы / Ю.А. Розанов – М.: «Наука», 1971, 286 с.
63. Воробьев О.Ю. Модели состояний некоторых распределительных: вероятностных процессов / О.Ю. Воробьев // Изв. Сибир. отдел. АН СССР, серия: техн. наук, вып 1, №3, 1976.
64. Дынкин Е.Б. Марковские процессы / Е.Б. Дынкин – М.: «Физматгиз», 1963, 859 с.
65. Климов Р.П. Экстремальные задачи в теории массового обслуживания / Р.П. Климов // Сб. «Кибернетику – на службу коммунизму», т.2, – М.: «Энергия», 1964, с. 310-325.
66. Понтрягин Л. С. и др. Математическая теория оптимальных процессов – М.: Наука, 1976, с. 392.
67. Егоров Ю.В. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. Сб. «Математика на службе инженера (основы оптимального управления)» – М.: «Знание», 1973.
68. Павловский А.И. Специализация ремонта подвижного состава в железнодорожных узлах / А.И. Павловский – М.: «Транспорт», 1981, 88 с.
69. Шор Я.Б. Таблицы для анализа и контроля надежности / Я.Б. Шор, Ф.И. Кузьмин – М.: «Советское радио», 1968. 284 с.
70. Крагельского И.В. Трение изнашивание и смазка. Справочник, книга 1. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина – М.: Машиностроение, 1978, 400 с.
71. Галкин В.Г. Надежность тягового подвижного состава / В.Г. Галкин, В.П. Парамзин, В.А. Четвергов – М.: Транспорт, 1981, 184 с.

72. Колмогоров А.Н. Об аналитических методах в теории вероятностей / А.Н. Колмогоров – «Успехи математических наук», вып. 5, 1938, с. 5–41.
73. Хинчин А.Л. Работы по математической теории массового обслуживания / А.Л. Хинчин – М.: Изд-во Д.М., 1963, 235 с.
74. Григелионис Б. И. О сходимости сумм ступенчатых случайных процессов к пуассоновскому / Б. И. Григелионис – «Теория вероятностей и ее применения». 1963, Т. 8, № 2. С. 189–194.
75. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло / И.М. Соболев – М.: «Наука», 1973, 311 с.
76. Голенко Д.И. Образование случайных величин с произвольным законом распределения / Д.И. Голенко – Вычислит. математика. 1959, №5, 83-92.
77. Михайлов В.И. Планирование экспериментов в судостроении / В.И. Михайлов, К.М. Федосов – Л.: Судостроение, 1978, 159с.
78. Ефремов И.С. Надежность тяговых подстанций городского транспорта / И.С. Ефремов, Т.И. Лаптева – М.: Транспорт, 1975, с.176.
79. Козлов В.Е. Пропускная способности железнодорожных линий и надежность технических устройств. М., Вестник ВНИИЖТа №4, 1979.
80. Инин В.М. Исследование оптимального распределения ремонтов пути в межремонтный период в связи с повышением скоростей движения грузовых поездов. Л. Автореферат диссертации, 1979, с.29.
81. Босов А.А., Довбня Н.Н., Ильчук А.В. «Моделирование восстановления технических объектов с учетом специализации концентрации ремонтной базы». Деп. ВИНТИ МПС №2635, 29.11.84, с.15.
82. Босов, А. А. Методы решения некоторых задач оптимальных тяговых расчетов на ЭЦВМ: дис. канд. техн. наук / А. А. Босов. – Днепропетровск: 1968. – 145 с.



83. Кокс Д. Теория восстановления / Д. Кокс, В. Смит. – М.: Сов. радио, 1967, 299 с.
84. Боровков А.А. Теория вероятностей / А.А. Боровков. – М.: Наука, 1986. – 432 с.
85. Розанов Ю. А. Случайные процессы (Краткий курс) / Ю. А. Розанов. – М.: Наука, 1971. – 286 с.
86. Бернштейн С. Н. Теория вероятностей / С. Н. Бернштейн. – М.; Л.: ОГИЗ, 1946. – 556 с.
87. Благодатских В. И. Принцип максимума для дифференциальных включений / В. И. Благодатских // Тр. МИАН СССР. – 1984. – Т. 166. – С. 23–43.
88. Благодатских В. И. Дифференциальные включения и оптимальное управление / В. И. Благодатских, А. Ф. Филиппов // Тр. МИАН СССР. – 1985. – Т. 169. – С. 194–252.
89. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач / Ф. П. Васильев. – М.: Наука, 1980. – 518 с.
90. Босов А. А. Оценка влияния стационарного диагностирования на надежность локомотивов / А. А. Босов, М. И. Капица // Актуальные проблемы развития транспортных систем и строительного комплекса: тр. Междунар. научно-практ. конф. / под общ. ред. В. И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2001. – С. 51–54.
91. Филиппов А. Ф. Об условиях существования решений многозначных дифференциальных уравнений / А. Ф. Филиппов // Дифференциальные уравнения. – 1977. – Т. 13, № 6. – С. 1070–1078.

*Научное издание*

А. А. БОСОВ, П. А. ЛОЗА

# **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЦИОНАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Монография

Компьютерная вёрстка А. А. Мищенко

Компьютерный набор А. В. Гридасова

Дизайн обложки А. А. Заиченко

Издательство ООО предприятие «Дриант»

Свидетельство субъекта издательского дела

А01 № 053594 от 09.04.2009 г.

г. Днепропетровск, пр. Калинина, 55

т/ф.(056) 370 30 22

Отпечатано:

ЧФ «Стандарт-Сервис». Днепропетровская обл.,

пгт. Юбилейное, ул. Совхозная, д.68, к.65.

Подписано в печать 19.02.15. Формат 29,7х421/4. Бумага офсет.

Ризографическая печать. Услов. печ. лист. 14,55. Тираж 300 экз. Зак. №18.

ISBN 978-966-2394-15-3



**Босов Аркадий Аркадиевич.** Доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная математика» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика

В. Лазаряна. Научные интересы связаны с разработкой математических моделей на железнодорожном транспорте. В данной области опубликовано более 150 работ, среди которых четыре монографии.



**Лоза Петр Алексеевич.** Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав железных дорог» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика

В. Лазаряна. Имеет большой опыт практической работы и в системе локомотивного хозяйства и в системе железной дороги в целом. Прошел путь от начальника локомотивного депо до начальника железной дороги.

Научные интересы связаны с оптимизацией различных процессов работы звеньев железнодорожного транспорта. В данной области опубликовано несколько десятков научных работ.