

**Ташкентский институт инженеров
железнодорожного транспорта**

КОНСПЕКТ

лекций по дисциплине «Железнодорожный путь»

**для магистрантов специальности 5А580205 –
«Строительство железных дорог, путь и путевое
хозяйство»**



**СОСТАВИТЕЛЬ:
доц. Овчинников А.Н.
Ташкент 2010 г.**

Овчинников А.Н, Расулев А.Ф. Конспект лекций по дисциплине «Железнодорожный путь», раздел «Надёжность железнодорожного пути» – Ташкент: ТашИИТ, 2007, 50 с.

В настоящем конспекте лекций приведены материалы, обобщающие многолетний опыт по изучению вопросов надёжности работы железнодорожного пути. Даны основные положения теории надёжности, применительно к железнодорожному пути. Конспект лекций предназначен для магистрантов специальности 5А580205 – «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство».

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ЛЕКЦИЯ 1: ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ О ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ | 4 |
| 1.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ЗАДАЧИ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ..... | 4 |
| 1.2 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ | 4 |
| | 5 |
| 1.3 ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ..... | 5 |
| 1.4. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ..... | 5 |
| ЛЕКЦИЯ 2: ОТКАЗ И КРИТЕРИИ НАДЕЖНОСТИ | 7 |
| 2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ВИДЫ ОТКАЗОВ | 7 |
| 2.2. КРИТЕРИИ НАДЕЖНОСТИ..... | 7 |
| 2.3. ПОНЯТИЕ ДИСПЕРСИИ | 9 |
| ЛЕКЦИЯ 3: ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ | 11 |
| 3.1 ПЕРЕЧЕНЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ | 11 |
| 3.2 ГРАФИКИ $F(T)$; $P(T)$; $F(T)$ | 12 |
| 3.3 ПАРАМЕТРЫ БЕЗОТКАЗНОСТИ ДЛЯ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ..... | 13 |
| ЛЕКЦИЯ 4: ПОКАЗАТЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ | 16 |
| 4.1. ПОКАЗАТЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ..... | 16 |
| 4.2. ПОКАЗАТЕЛИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ..... | 17 |
| 4.3. КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ | 18 |
| ЛЕКЦИЯ 5: ВИДЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ НАДЕЖНОСТИ | 19 |
| 5.1 ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ | 21 |
| 5.2 ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ ЗАКОН | 21 |
| 5.3 НОРМАЛЬНЫЙ ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ (ЗАКОН ГАУССА)..... | 22 |
| 5.4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЙБУЛЛА..... | 24 |
| ЛЕКЦИЯ 6: СИСТЕМА СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ | 24 |
| 6.1. ЦЕЛЬ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ОБ ОТКАЗАХ ОБЪЕКТА..... | 24 |
| 6.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ..... | 25 |
| 6.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ..... | 27 |
| 6.4. РАССЕИВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ..... | 28 |
| ЛЕКЦИЯ 7: РАСЧЕТ СХЕММНОЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ | 30 |
| 7.1. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ПО НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ..... | 31 |
| 7.2. НАДЕЖНОСТЬ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ..... | 32 |
| 7.3. ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ УЗЛА СКРЕПЛЕНИЯ..... | 34 |
| 7.4. ПУТЬ - КАК СИСТЕМА С РЕЗЕРВНЫМИ НАГРУЖЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ..... | 34 |
| ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ | 40 |
| Д.1. ПРОЦЕССЫ СТАРЕНИЯ И МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСТЕПЕННЫХ ОТКАЗОВ..... | 46 |
| Д.2. ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ..... | |
| Д.3.ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЛЬСОВ..... | |

План лекции

1. Определение и задачи теории надежности.
2. Основные понятия и термины теории надежности.
3. Основные определения и показатели.
4. Показатели надежности железнодорожного пути.

Литература

1. Путь и безопасность движения поездов. Под ред. В.Я. Шульги. М.: Транспорт, 1994.
2. Н.И. Карпущенко. Надежность железнодорожного пути. Новосибирск, НИИЖТ, 1989.

1.1. Определение и задачи теории надежности

Надежность - свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемых промежутков времени или наработки. Надежность включает в себя понятия:

безотказность;
долговечность;
ремонтопригодность.

Под **теорией надежности** понимается наука, включающая в себя систему определенных знаний, математических моделей и методов, направленных на решение проблем предсказания, оценки и оптимизации различных показателей надежности, например:

вероятность безотказной работы;
среднее время безотказной работы;
вероятность исправной работы системы в заданный или произвольный момент времени, и т.д.

Главная задача теории надежности - установление закономерностей возникновения отказов конструкций и методов прогнозирования.

Отказы возникают в случайном порядке, т.е. теория надежности базируется на математическом аппарате статистики, теории вероятностей

(включая теорию случайных процессов).

Пример применения теории надежности в путевом хозяйстве:

определение межремонтных сроков с учетом различных эксплуатационных параметров;
определение периодичности контроля состояния элементов верхнего строения пути;
периодичность выполнения работ текущего содержания пути и т.д.

1.2. Основные понятия и термины теории надежности

Объект - предмет определенного целевого назначения (системы или элементы).

Система - техническое устройство состоящая из конструктивно и функционально объединенных элементов, предназначенных для выполнения практических задач.

Работоспособное состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значение заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

Исправное состояние - при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Неработоспособность - понятие, обратное работоспособности.

Неисправность - понятие, противоположное исправности.

Отказ - событие, заключающееся в нарушении работоспособности:

- а) частичный отказ; (требуют уменьшения V , км/ч);
- б) полный отказ; (излом рельса);
- в) постепенный отказ (износ);
- г) внезапный отказ (излом).

1.3. Основные определения и показатели

Наработка - продолжительность или объем работы (например, для ж.д. пути - млн.т брутто).

Безотказность - свойство объекта сохранять работоспособность в течение некоторого времени (наработки).

Долговечность - свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния.

Ремонтпригодность - свойство объекта, связанное с приспособленностью и выполнению его ремонта и текущего содержания.

Для неремонтируемых изделий: безотказность = долговечность.

Показатели надежности - это количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

1.4. Показатели надежности железнодорожного пути

Пример: ниже приведена таблица повышения надежности пути

Таблица 1

| Показатели надежности пути | Г о д ы | | | |
|--|---------|------|------|------|
| | i | I+1 | I+2 | I+3 |
| Вес рельса, кг/м, q (средний) | 45,6 | 52,3 | 57,0 | 62,3 |
| Средняя эпюра шпал, М, шт/км | 1684 | 1795 | 1814 | 1850 |
| Среднесетевое число одиночных отказов рельсов в год на 100 км развернутой длины главных путей N, шт/100 км | 952 | 117 | 118 | 120 |

| | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Средняя грузонапряженность, млн.т км брутто на км в год, T_0 | 18,9 | 29,0 | 34,6 | 38,3 |
| Параметр отказов $a = N/T_0$, шт в год/млн.т | 13,3 | 4,0 | 3,4 | 3,1 |
| Наработка на отказ: $b = T_0/N$, млн.т/шт год | 0,075 | 0,048 | 0,293 | 0,315 |

В работе железнодорожного пути железнодорожного пути различают два вида отказов:

полные (требуют перерыва в движении поездов и ограждение места работы сигналами остановки):

частичные (как правило требуют уменьшения скорости движения поездов).

Из общего числа общих отказов пути более 95% составляют одиночные отказы рельсов.

Поэтому в качестве основного показателя надежности пути используют среднесетевое число одиночных отказов рельсов в год на 100 км развернутой длины главного пути в год -(табл. 1).

Контрольные вопросы

1. Определение надежности.
2. Составляющие параметры надежности.
3. Главная задача теории надежности.
4. Основные понятия и термины теории надежности.
5. Основные определения и показатели теории надежности.
6. Виды отказов железнодорожного пути.
7. Показатели надежности железнодорожного пути.

Лекция №2: ОТКАЗ И КРИТЕРИИ НАДЕЖНОСТИ

- План лекции:
1. Определение и виды отказов.
 2. Критерии надежности.
 3. Понятие дисперсии.

Литература, используемая в лекции

1. Карпущенко Н.И. Надежность железнодорожного пути. Новосибирск, НИИЖТ, 1989.
2. Барлоу Р. Математическая теория надежности. М. Советское радио, 1969.

2.1. Определение и виды отказов.

Отказ - событие, заключающееся в нарушении работоспособности.

1. Частичный отказ - изделие перестает выполнять какую либо одну или несколько функций или выполняет свои функции с пониженными параметрами.
2. Полный отказ - объект перестает выполнять все функции (излом рельса).
3. Постепенный отказ - проявляется в постепенном изменении одного или нескольких параметров объекта (износ, коррозия, усталость и т.д.).
4. Внезапный отказ - проявляется в скачкообразном изменении параметров объекта. Объекты подразделяются на невосстанавливаемые (рельс длиной 25 м - излом) и восстанавливаемые (плеть 800 м).

2.2. Критерии надежности

Критерии надежности невосстанавливаемых объектов:

вероятность безотказной работы $P(t)$;

вероятность отказа $F(t)$;

плотность распределения наработки до отказа $f(t)$;

интенсивность отказов

средняя наработка до первого отказа T_{cp} .

2.2.1. Вероятность безотказной работы - вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или наработки не произойдет ни одного отказа.

$$P(t) = P(T > t),$$

где t - время или наработка, в течение которого определяется вероятность безотказной работы;

T - время или наработка от начала до первого отказа.

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением:

$$P(t) = N(t_i) / N_0,$$

где N_0 - число изделий в начале испытаний;

$N(t_i)$ - число безотказно проработавших изделий к моменту t_i .

При большом количестве $\overline{P(t)} \approx P(t)$.

2.2.2. Вероятность отказа - вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени наступит хотя бы один отказ

$$F(t) = 1 - P(t);$$

$$F(t) = P(T \leq t);$$

$F(t_i) = r(t_i) / N_0$; где $r(t_i)$ - число отказов к моменту времени t_i .

2.2.3. Плотность распределения наработки - до отказа - отношение числа отказавших изделий в единицу времени к первоначальному числу испытываемых изделий:
 $f(t) = -P^1(t) = F^1(t)$;

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt ; \quad P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt ;$$

Статическая оценка плотности вероятности безотказной работы: $f(t) = n_i / (N_0 \Delta t)$,

где n_i - число отказавших изделий в интервале Δt .

2.2.4. Интенсивность отказов - отношение числа отказавших изделий в единицу наработки к числу изделий, безотказно работающих к рассматриваемому моменту времени:.

$$\lambda(t_i) = n_i / (\Delta t N(t)) ;$$

Вероятностная оценка интенсивности отказов: $\lambda(t) = f(t) / P(t)$; при этом:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

(это связь между интенсивностью отказов $\lambda(t)$ и $P(t)$).

Результаты испытаний однотипных элементов

I - период приработочных отказов; (отказы, внезапные, дефекты производства).

II - период нормальной работы $\lambda(t) = \text{const}$.

III - период ускоренного старения (износ, усталость).

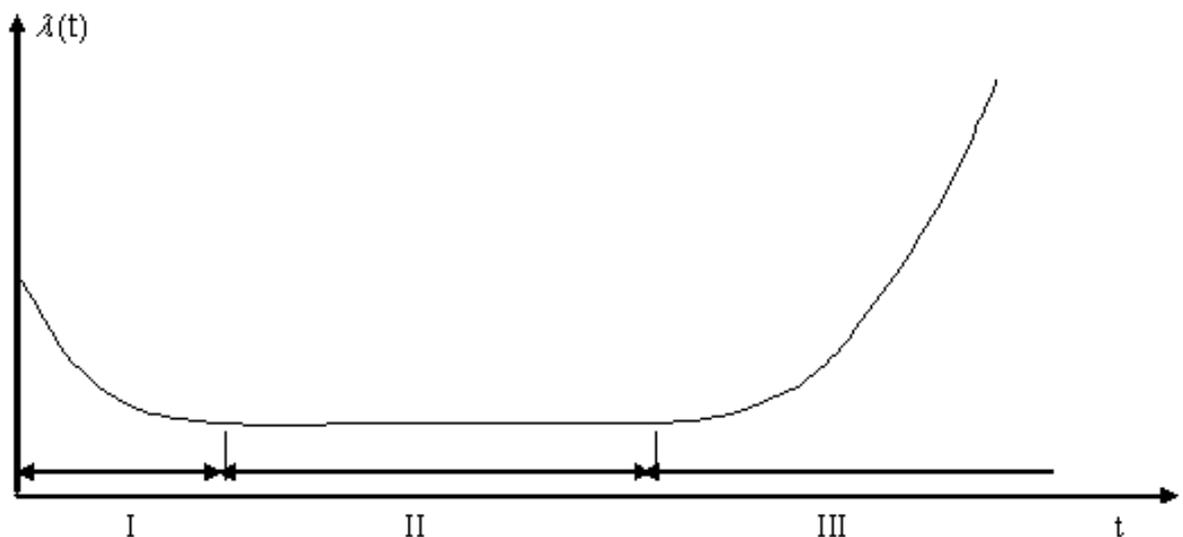


Рис 2.1

2.2.5. Средняя наработка до 1^{го} отказа - математическое ожидание величины t:

$$M_t = T_{cp} = \int_0^{\infty} f(t) dt = - \int_0^{\infty} t P'(t) dt = -t P(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt$$

так как $P(0) = 1$ и $P(\infty) = 0$, то

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt$$

По статическим данным об отказах

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^N t_i / N_0 ;$$

где t_i - время (наработка) безотказной работы i-го образца изделия;

N_0 - число испытываемых образцов.

2.3. ПОНЯТИЕ ДИСПЕРСИИ

Основная характеристика рассеивания случайной величины является *дисперсия* этой величины:

$$D_t = \int_0^{\infty} (t - T_{cp})^2 f(t) dt;$$

или статически:

$$D_t = \sum_{i=1}^N (t_i - T_{cp})^2 / N_0 - 1;$$

Среднее квадратическое отклонение - (мера рассеивания)

$$S_t = \sigma_t = \sqrt{D_t}$$

Коэффициенты вариации:

$$v_t = S_t / T_{cp}$$

Рассмотренные критерии надежности позволяют оценить надежность невосстанавливаемых изделий.

Контрольные вопросы

1. Определение отказа.
2. Виды отказов.
3. Критерии надежности невосстанавливаемых объектов.
4. Вероятность безотказной работы.
5. Вероятность отказа.
6. Плотность распределения наработки.
7. Интенсивность отказов.
8. u-образная кривая интенсивности отказов.
9. Средняя наработка до 1^{го} отказа.
10. Характеристики рассеивания случайной величины.
11. Среднеквадратическое отклонение
12. Коэффициент вариации

Тема лекции № 3: ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ

План лекции

1. Перечень показателей для невосстанавливаемых объектов.
2. Графики $F(t)$; $P(t)$; $f(t)$.
3. Параметры безотказности для восстанавливаемых объектов.

Литература

1. Барлоу Р., Прошман Ф. Математическая теория надежности М., Советское радио, 1969.
2. Карпущенко Н.И., Тарнопольский Г.И. Надежность железнодорожного пути. НИИЖТ, 1989.

3.1. Перечень показателей для невосстанавливаемых объектов

К показателям безотказности относятся:

генеральная совокупность;
выборка (полная или усеченная);
средняя наработка до первого отказа;
частота отказа;

плотность вероятности наступления отказа (плотность распределения наработки до отказа).

Генеральная совокупностью называется совокупность объектов, надежность (в частности-безотказность) которых исследуется.

Выборка - часть генеральной совокупности, подвергшаяся исследованиям безотказности. Если все испытываемые объекты доработали до отказа, то выборка считается полной.

Усеченная выборка - если испытания прекращены до того, как все изделия в выборке отказали.

Средняя наработка до 1^{го} отказа:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^k t_i}{N_0} \quad T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^k t_i}{N_0} \quad ; \quad (\text{средневзвешенная величина})$$

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^k t_i n_i}{N_0}$$

Частота отказов

$$w_i = \frac{n_i}{N_0}$$

где n_i - количество отказов в определенном интервале времени или интервале наработки

N_0 - общее число испытываемых образцов (генеральная совокупность).
Плотность распределения наработки до отказа:

$$\bar{f}(t_i) = \frac{n_i}{\Delta t \cdot N_0} ;$$

где Δt - длина интервала (продолжительность или наработка).

Накопленная часть безотказной работы:

$$\bar{P}(t_i) = \frac{N(t_i)}{N_0} = \frac{[N_0 - r(t_i)]}{N_0} = \frac{N_0 - \sum_{i=1}^i n_i}{N_0} ;$$

Накопленная часть отказов

$$\bar{F}(t_i) = \frac{r(t_i)}{N_0} = 1 - \bar{P}(t_i) = \frac{\sum_{i=1}^i n_i}{N_0} ;$$

Ниже приведен пример графика вероятности отказов $F(t)$ и графика безотказной работы $P(t)$.

3.2. Графики $F(t)$; $P(t)$; $f(t)$

Пример графика плотности вероятности наступления отказа $f(t)$ - по результатам статистической обработки приведен выше.

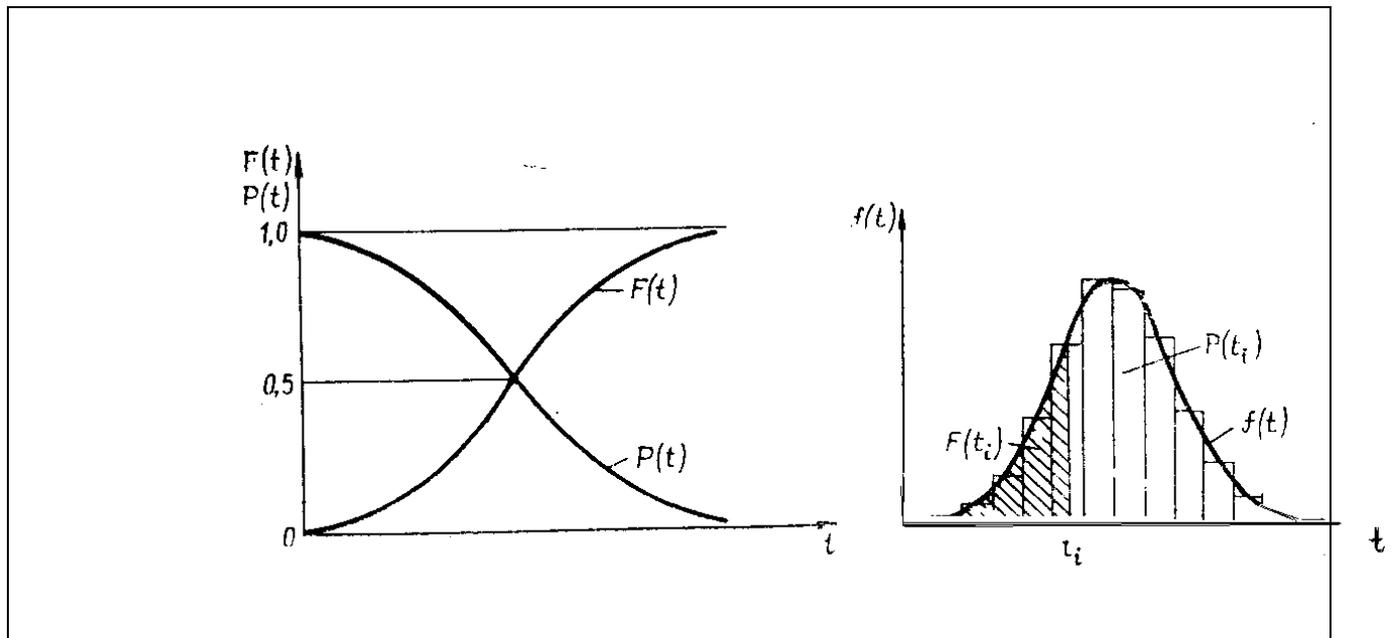


Рис 2.1

Площадь каждого столбика

$$\bar{f}(t_i) \cdot \Delta t = \frac{n_i}{N_0} = \omega_i - \text{частота}$$

$$\sum \omega_i = 1$$

См. рисунок:

$$\bar{F}(t_i) = \frac{\sum_{i=1}^i n_i}{N_0} = \sum_{i=1}^i \bar{f}(t_i) \cdot \Delta t$$

$$P(t_1) = \frac{1 - \sum_{i=1}^i n_i}{N_0}$$

$$\bar{P}(t_i) + \bar{F}(t_i) = 1.$$

3.3. Параметры безотказности для восстанавливаемых объектов

Для восстанавливаемых объектов безотказность оценивается показателями:

средняя наработка до отказа;
 вероятность безотказной работы;
 наработка на отказ;
 среднее число отказов;
 характеристика и параметр потока отказов.

Все, что рассматривалось для невозстанавливаемых объектов, относится также и восстанавливаемым до их первого отказа.

Что касается последующей работы восстанавливаемого объекта, то она существенно отличается от невозстанавливаемого.

Пример восстанавливаемого объекта: рельсовая плеть, шпалы, балластный слой.

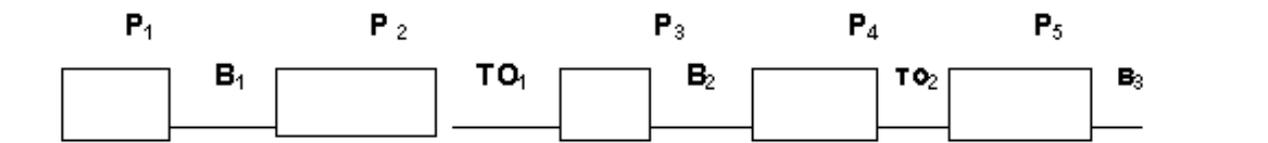
Ниже приведен график работы бесстыковой плети, где показаны:

A_i - моменты отказов;

B_i - время на ремонт плети;

TO_i - время на техническое обслуживание.

Процесс работы восстанавливаемого объекта



Выделим участки работоспособности: получим график потока отказов.



Характеристикой потока отказов является «ведущая функция»

$\Omega(t)$ данного потока - среднее число отказов на одно изделие к моменту наработки t :

$$\bar{\Omega}(t) = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{r_i(t)}{N_0}$$

$r_i(t)$ - количество отказов i -го изделия;

При этом *наработка на отказ* - среднее значение наработки между отказами:

$$\bar{t}_{\text{отк}} = \frac{N_0 \cdot t}{\sum_{i=1}^{N_0} r_i(t)} = \frac{t}{\bar{\Omega}(t)}$$

Параметр потока отказов:

среднее число отказов на одно изделие и на единицу наработки от t_1 до t_2 :

$$\bar{\omega} = \frac{1}{\bar{t}_{\text{отк}}} = \frac{\bar{\Omega}(t_2) - \bar{\Omega}(t_1)}{t_2 - t_1} ;$$

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} r_i(t)}{N_0 \cdot t} \quad \text{- если все изделия имеют одинаковую наработку } t$$

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} r_i(t)}{\sum_{i=1}^{N_0} t_i} \quad \text{- если наработка у изделий различная.}$$

Переходя к пределу получаем вероятностные значения указанных показателей:

- ведущая функция отказов:

$$\Omega(t) = \lim_{N_0 \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^{N_0} r_i(t)}{N_0} ;$$

- параметр потока отказов:

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t} \frac{\Omega(t + \Delta t) - \Omega(t)}{\Delta t} ;$$

$$\omega(t) = \frac{d\Omega(t)}{dt}, \quad \text{откуда}$$

$$\Omega(t) = \int_0^t \omega(t) dt.$$

Контрольные вопросы

1. Показатели безотказности для невосстанавливаемых объектов.
2. Генеральная совокупность.
3. Виды выборки.
4. Показатели $T_{ср}$, ω_i , $\bar{\int}(t)$.
5. График $F(t)$; $P(t)$ - пример.
6. График $\int(t)$ - пример.
7. Показатели безотказности для восстанавливаемых объектов.
8. Характеристика потока отказов.
9. Параметр потока отказов.
10. Вероятностные значения характеристики и потока отказов.

Лекция №4: **ПОКАЗАТЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ.**
КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ.

План лекции

1. Показатели долговечности.
2. Показатели ремонтпригодности.
3. Комплексные показатели надежности.

Литература

1. Карпущенко Н.И., Тарнопольский Г.И. Надежность железнодорожного пути. Новосибирск, 1989.

4.1. Показатели долговечности.

К показателям

средний ресурс $R_{\text{ср}}$;
гамма-процентный ресурс R_{γ} ;
назначенный ресурс;
гарантийная наработка;
сохраняемость объекта

Ресурс - наработка от начала эксплуатации до предельного состояния (в соответствии с технической документацией).

Ресурс объекта может быть полностью описан функцией распределения $F_R(t)$. При этом закон распределения может быть также охарактеризован плотностью вероятности $f_B(e) = F_R^{-1}(t)$.

Важнейшей численной характеристикой закона распределения ресурса элементов является **средний ресурс** - $R_{\text{ср}}$;

Гамма-процентный ресурс R_{γ} - наработка в течение которой объем не достигает предельного состояния с вероятностью γ , %.

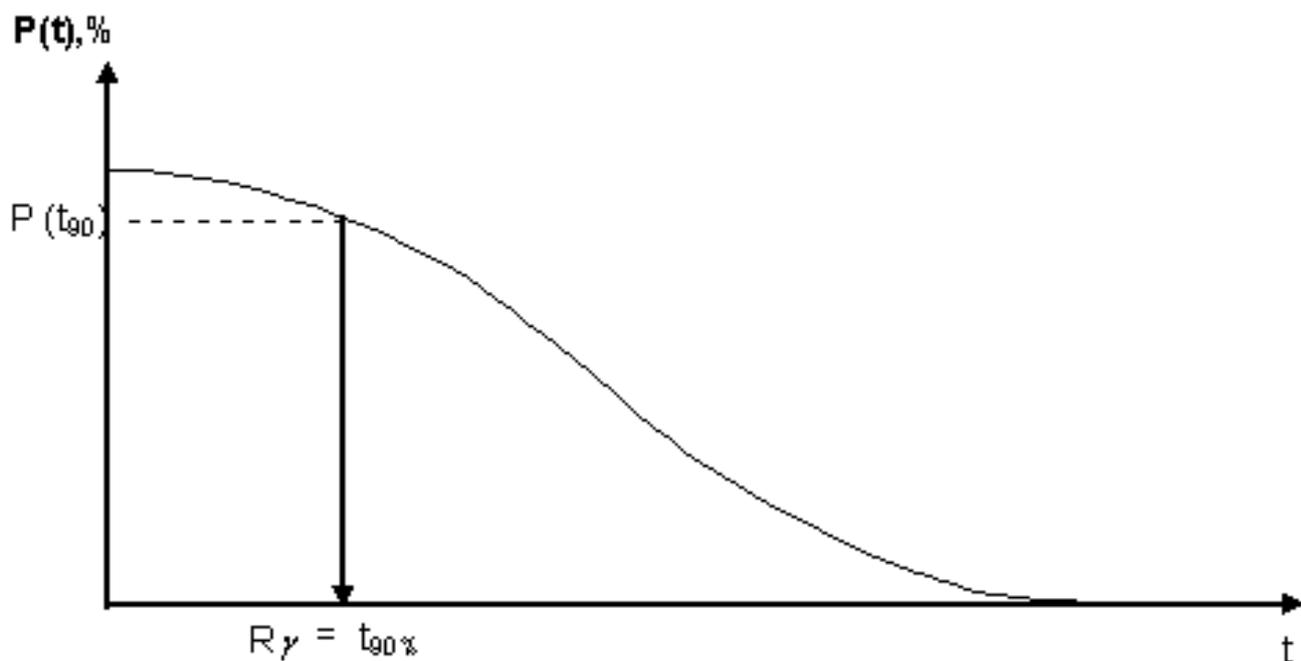
Т.е. R_{γ} является характеристикой вероятности неразрушения.

Гамма-процентный ресурс определяется из отношения:

$$P(R_{\gamma}) = \frac{\gamma}{100} ;$$

Ниже приведена кривая вероятности работы и указано $P(R_{\gamma})$, когда

$\gamma=90\%$ (например). Это значит, что к моменту наработки $R_{\gamma} = T_{90\%}$ осталось работоспособными 90% изделий.



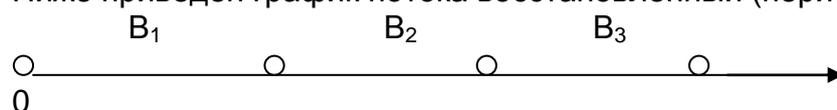
Назначенный ресурс - наработка изделия, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от состояния изделия.

Гарантийная наработка - наработка изделия, до завершения которой изготовитель гарантирует и обеспечивает выполнение определенных требований к изделию при усвоении соблюдения потребителем правил эксплуатации, в том числе правил хранения и транспортирования.

Сохраняемость оценивается показателями, аналогичными тем, которые применяются для оценки долговечности, например, «срок сохраняемости», «средний срок сохраняемости», «гамма-процентный срок сохраняемости» и др. Этими показателями оценивается сохраняемость изделий, подвергнутых консервации и находящихся на складах в качестве запасных частей.

4.2. ПОКАЗАТЕЛИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ

Ниже приведен график потока восстановлений (периоды ремонта)



Среднее время восстановления - время вынужденного нерегламентированного простоя, вынужденного необходимостью отыскания и установления одного отказа.

Регламентированный простой - время на техническое обслуживание (не входит в поток восстановлений).

$$\bar{t} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i,$$

где $t_1, t_2, t_3, \dots, t_m$ - время на отыскание причин отказов и их устранение
 m - число отказов,

\bar{t}_e - включает в себя время ремонта и время на поиск причин

отказа и не включает в себя время на организационные мероприятия.

К ремонтпригодности относится также приспособляемость объекта и проведению плановых обслуживаний и ремонтов.

4.3. КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Изделие при недостаточной безотказности, но при условии высокой ремонтпригодности может иметь достаточный уровень надежности.

Комплексные показатели, которые учитывают безотказность и ремонтпригодность, называют коэффициентами готовности и технического использования.

ПРИМЕР: в течение некоторого времени машина ВПР-1200 работала в течение $t_{\text{раб}}$, в ремонте $t_{\text{рем}}$, в техническом обслуживании $t_{\text{ТО}}$, в покое $t_{\text{пок}}$.

$$t = t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{ТО}} + t_{\text{пок}},$$

КОЭФФИЦИЕНТ ГОТОВНОСТИ - вероятность того, что объект будет работоспособен в произвольно выбранный момент времени в промежутках между выполнениями планового технического обслуживания:

$$K_r = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}}};$$

$t_{\text{раб}}$ - суммарная наработка всех объектов в единицах времени;

$t_{\text{рем}}$ - суммарное время простоев из-за внеплановых ремонтов.

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕХНИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ - отношение наработки изделия в единицах времени за некоторый период эксплуатации к сумме этой наработки и времени простоев, вызванных плановым техническим обслуживанием и незапланированными ремонтами за тот же период эксплуатации:

$$K_{\text{ти}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{ТО}}};$$

Возможно, что при высоком коэффициенте готовности коэффициент технического использования может быть низким (при высоком $t_{\text{ТО}}$).

Контрольные вопросы

1. Показатели надежности.
2. Ресурс и средний ресурс объекта.
3. Гамма-процентный и назначенный ресурс.
4. Гарантированная наработка и сохраняемость.
5. Показатели ремонтпригодности.
6. Комплексные показатели надежности.
7. Коэффициент готовности.
8. Коэффициент технического использования.
9. Взаимосвязь между коэффициентом готовности и коэффициентом технического использования.

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Основные виды распределения.
2. Экспоненциальный закон.
3. Нормальный закон распределения (закон Гаусса).
4. Распределение Вейбулла.

Литература

1. Р. Барлоу; Ф. Прошман. Математическая теория надежности. Москва. 1969.
2. Н.И. Карпущенко, Г.И. Тарнопольский. Надежность железнодорожного пути, Новосибирск, НИИЖТ, 1989.
3. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике М., Стройиздат, 1965.

5.1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Для математического описания продолжительности безотказной работы различных устройств и систем используются распределение вероятностей.

Выбор конкретного вида распределения времени безотказной работы на основании подобных соображений, связанных с анализом физики протекающих процессов, слишком сильно зависит от интуиции исследователя. Для того, чтобы выбрать из многих функций распределения нужную, необходимо учитывать физику реальных процессов.

Наиболее распространенные виды распределений, используемые для описания усталостных отказов материалов, а также отказов механических и электронных систем.

1. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ:
2. ГАММА-РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЙБУЛЛА
4. МОДИФИЦИРОВАННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ
5. УСЕЧЕННОЕ НОРМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
6. ЛОГАРИФМИЧЕСКИ - НОРМАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ.

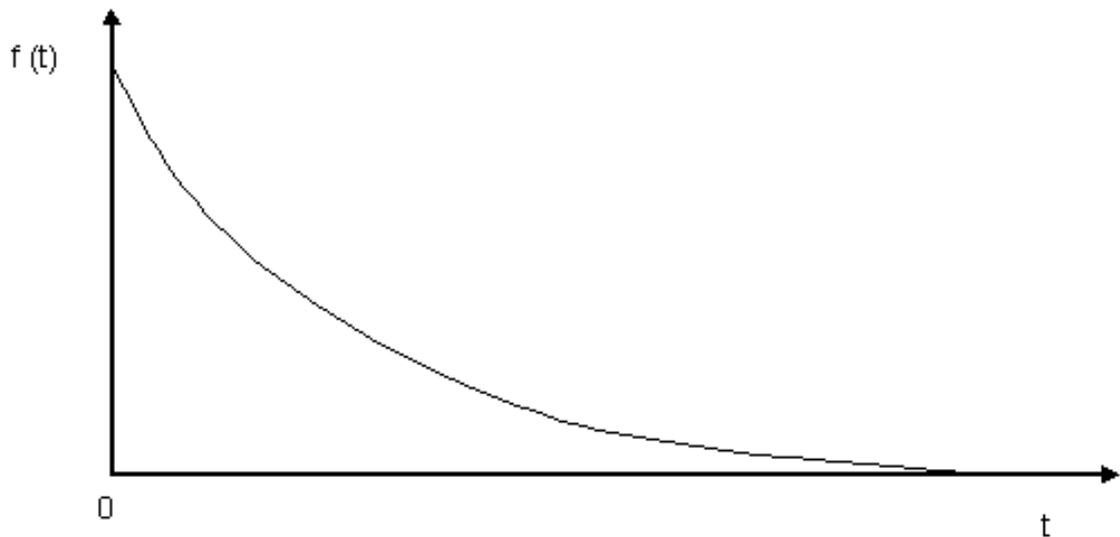
Рассмотрим наиболее часто применяемые законы распределения критериев надежности (см. табл.)

Таблица 2.1

| Наименование закона распределения | Плотность вероятности отказа $f(t)$ | Вероятность безотказной работы $P(t) = \int_0^t f(t) dt$ | Вероятность отказа $F(t) = 1 - P(t)$ | Интенсивность отказов $\lambda(t)$ | Средняя наработка до первого отказа T_{cp} | Дисперсия D_t |
|-----------------------------------|--|--|---|--|--|---|
| Экспоненциальный | $\lambda e^{-\lambda t}$ | $e^{-\lambda t}$ | $1 - e^{-\lambda t}$ | $\lambda = const$ | $\frac{1}{\lambda}$ | T_{cp}^2 |
| Нормальный | $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2\sigma^2}}$ | $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2\sigma^2}} dt$ | $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2\sigma^2}} dt$ | $\frac{f(t)}{P(t)}$ | T_{cp} | $\sigma^2 t$ |
| Вейбулла | $\frac{b}{t_0} \left(\frac{t}{t_0}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^b}$ | $e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^b}$ | $1 - e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^b}$ | $\frac{b}{t_0} \left(\frac{t}{t_0}\right)^{b-1}$ | $t_0 \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$ | $t_0^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) \right]^2 \right\}$ |

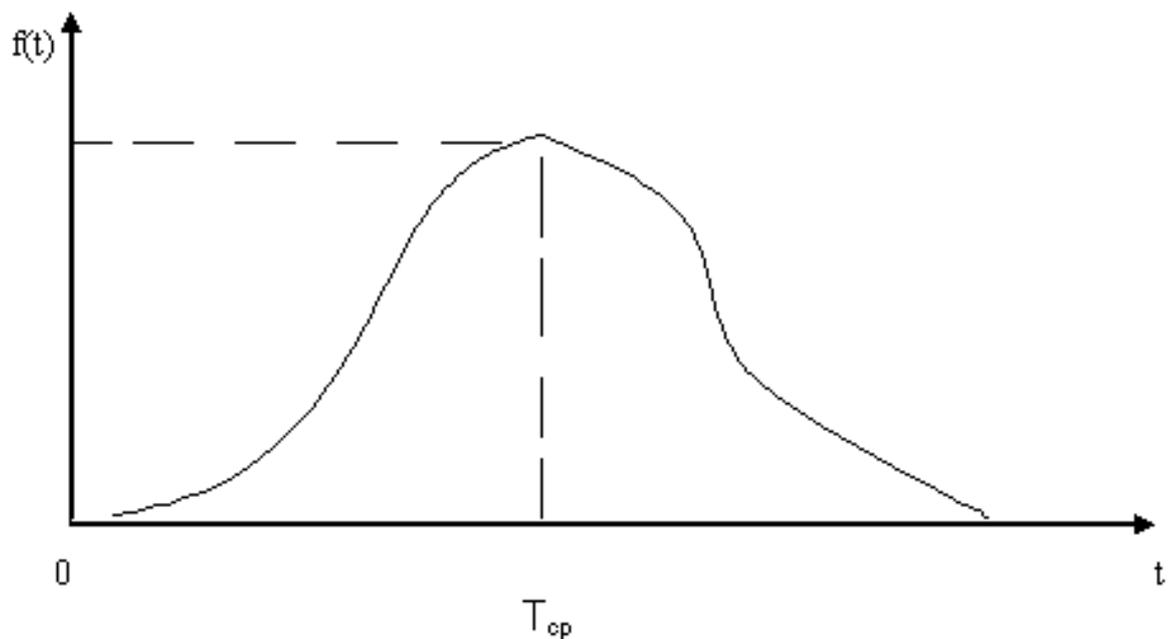
5.2. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ ЗАКОН:

Этому закону соответствуют внезапные отказы когда их интенсивность мало зависит от времени.



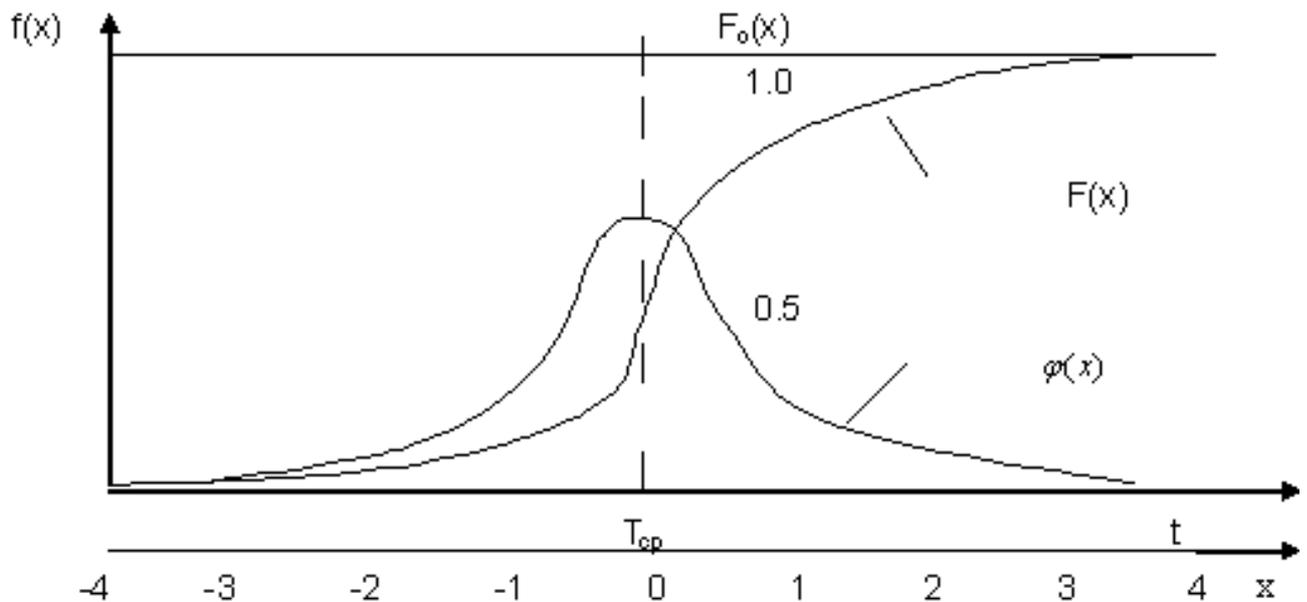
5.3. НОРМАЛЬНЫЙ ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ (ЗАКОН ГАУССА)

Принимается, когда отказы вызываются многими равновлияющими причинами



Более удобно пользоваться данным видом распределения, если начало координат

переместить в точку T_{cp} - на ось симметрии функции $f(t)$



- Заменяем переменную $x = (t - T_{\text{ср}}) / \sigma_t$;
и принимаем среднеквадратическое отклонение $\sigma_t = 1$.

В новых координатах получим новую центрированную и нормированную функцию с плотностью распределения:

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$$

Площадь $\varphi(x)$ от $-\infty$ до $+\infty$ равна 1.

$$F_0(x) = \int_{-\infty}^x \varphi(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-x^2/2} dx$$

При этом $F_0(-x) = 1 - F_0(x)$; $\varphi(-x) = \varphi(x)$

Обратный переход от центрированной к исходной функции:

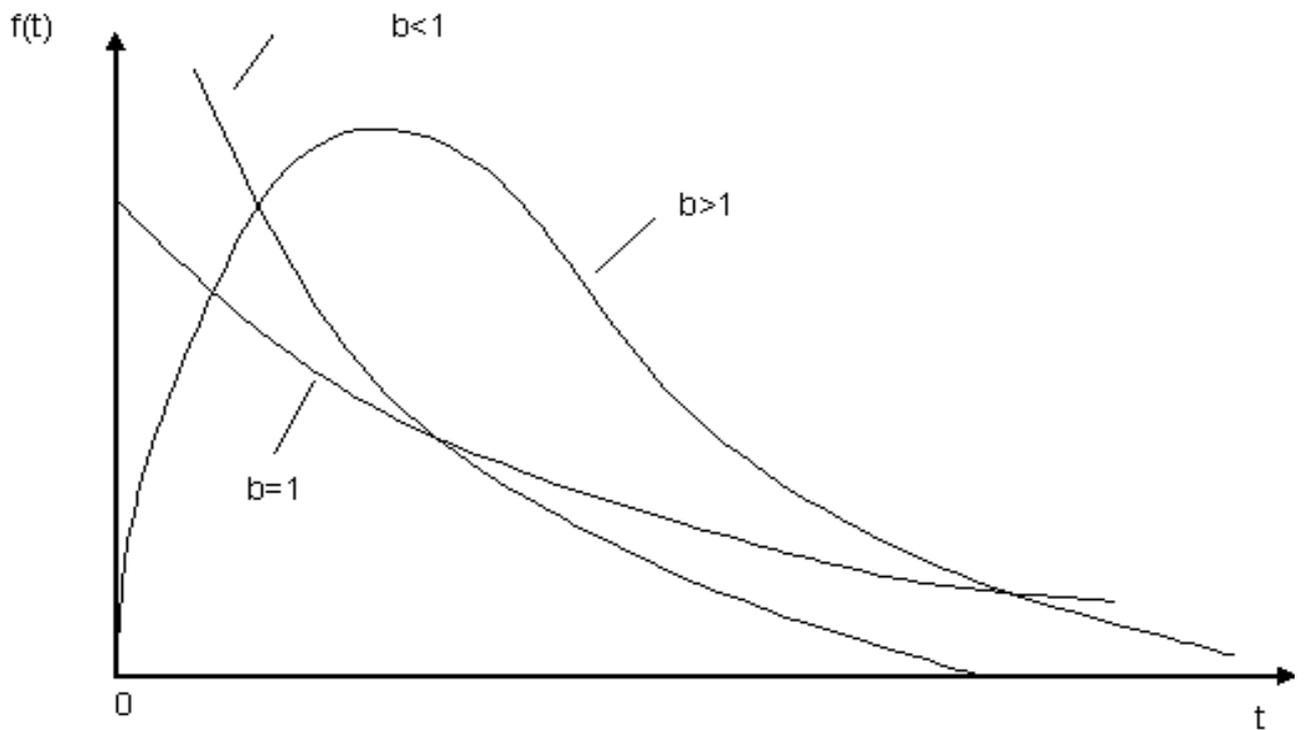
$$f(t) = \frac{\varphi(x)}{\sigma_t} = \frac{1}{\sigma_t} \varphi\left[\frac{(t - T_{\text{ср}})}{\sigma_t}\right];$$

$$F(t) = F_0(x) = F_0\left[\frac{(t - T_{\text{ср}})}{\sigma_t}\right]$$

В отличие от других видов распределений $f(t)$ отлична от нуля в интервале $(-\infty; +\infty)$.

5.4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЙБУЛЛА

Характерно в случае возникновения внезапных отказов и отказов из-за износов.



b - параметр формы кривых ;

t_0 - параметр, характеризующий растянутость кривых вдоль оси t .

Средняя наработка до первого отказа

$T_{cp} = T_0 \Gamma(1 + 1/b)$ где Γ - гамма-функция.

Приведенными видами распределения возможно описать критерии надежности элементов верхнего строения пути. Определение параметров надежности выполняется на практических занятиях.

Контрольные вопросы

1. Виды распределения критериев надежности.
2. Экспонциальный закон распределения.
3. Нормальный закон распределения.
4. Усеченное нормальное распределение.
5. Распределение Вейбулла.
6. График $f(t)$ для различных видов распределения.
7. То же $P(t)$.
8. То же $F(t)$.
9. То же $\lambda(t)$.

Лекция № 6: **СИСТЕМА СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ**
(4 час)

План лекции

1. Цель статистической обработки данных об отказах объекта.
2. Последовательность сбора и обработки информации о надежности.
3. Определение параметров надежности.
4. Рассеивание результатов.

Литература, используемая в лекции

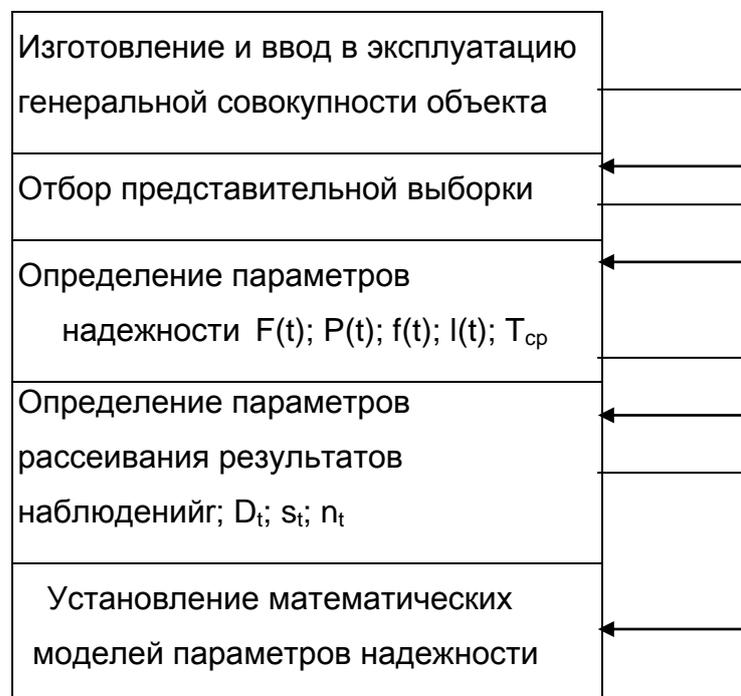
1. Надежность технических систем. Справочник под ред. И.А. Ушакова. М., 1985.
2. Н.И. Карпущенко, Г.И. Тарнопольский. Надежность железнодорожного пути. НИИЖТ, 1989.

6.1. ЦЕЛЬ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ОБ ОТКАЗАХ ОБЪЕКТА

Наиболее распространенной оценкой надежности объектов (элементов) железнодорожного пути является статистическая обработка данных об отказах, полученных в процессе эксплуатации.

Цель - повышение параметров надежности, полученных в результате обработки статистических данных об отказах.

**6.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
О НАДЕЖНОСТИ**



Оценка состояния каждого элемента пути и конструкции пути в целом производится в настоящее время по результатам обработки данных об отказах.

На перегонах отказы могут происходить из-за:

- дефектности рельсов;
- наличия негодных шпал;
- дефектности скреплений;
- потери устойчивости балласта;
- нарушение параметров по уровню, рихтовке, шаблону;
 - выброса пути;
 - разрыва плетей;
- нарушение в работе рельсовых цепей.

На основании данных об отказах строятся функции распределения отказов и дается оценка надежности - определяется вероятность отказа по данному элементу и конструкции верхнего строения пути в целом.

В целом на ГАЖК «Узбекистон тембр йуллари» в настоящее время планируется проведение компьютеризации всех служб и линейных предприятий, что позволит разработать и внедрить следующую схему оценки надежности пути:

6.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ

Величины t_i , n_i , ω_i (см. табл.) приведены в порядке нарастания наработки.

Определяется также средняя наработка

$$\bar{T}_{cp} = \frac{1}{N_0} (t_1 \cdot n_1 + t_2 \cdot n_2 + \dots + t_k \cdot n_k) = \sum_{i=1}^k \frac{t_i \cdot n_i}{N_0}$$

При этом количество и длину интервалов определяем по формуле:

$$\Delta t = \frac{R}{(1 + 3,3 \lg N_0)} = \frac{178}{(1 + 3,3 \cdot \lg 75)} = 24,8 \text{ млн. т}$$

$$t_{\min} = 16 \text{ млн. т}$$

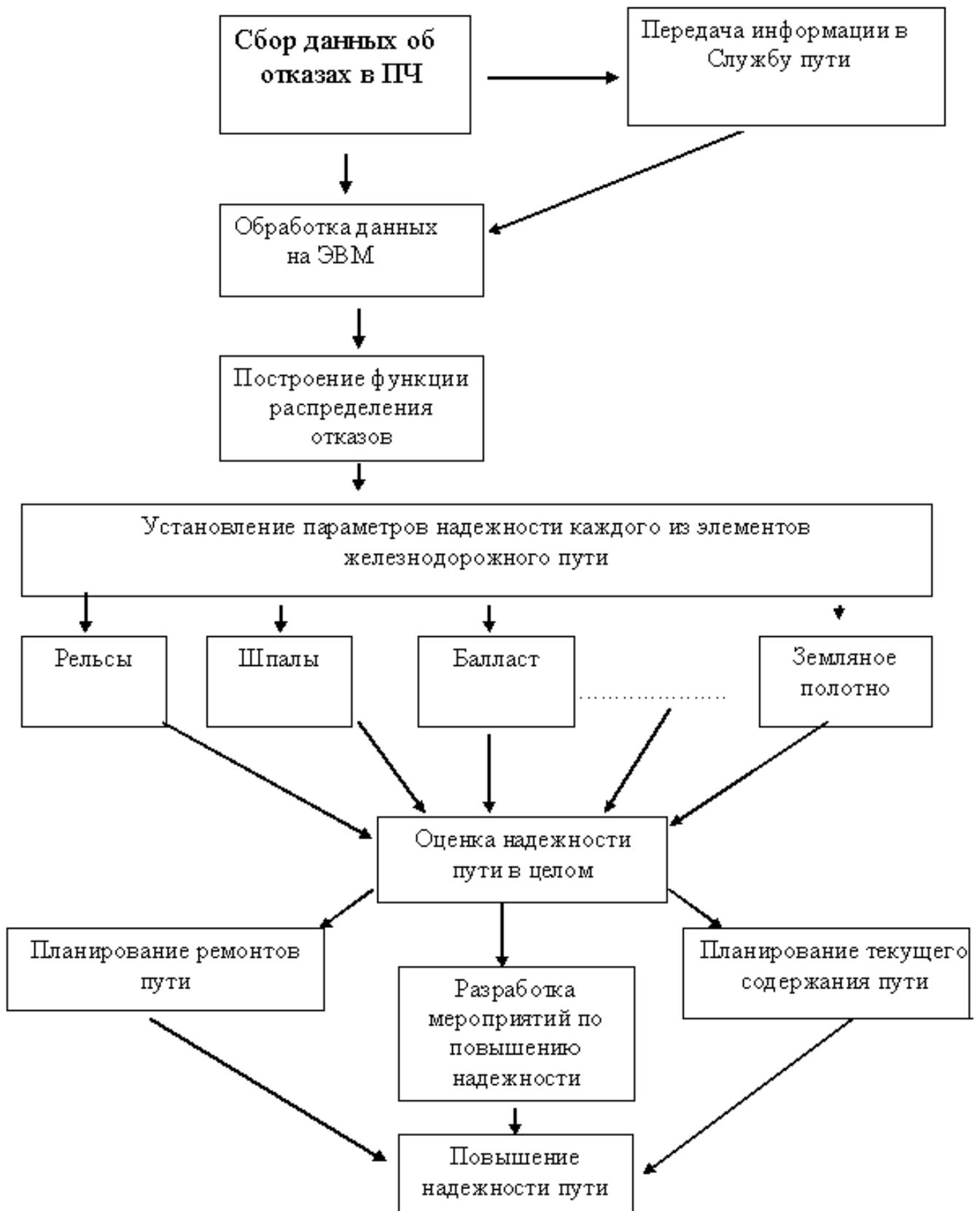
$$R = 194 - 16 = 178 \text{ млн. т}$$

$$t_{\max} = 194 \text{ млн. т}$$

Принято $\Delta t = 20$ млн.т брутто

$$T_{cp} = 122 \text{ млн.т брутто.}$$

Схема оценки надежности пути



6.4. РАССЕЙВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ оценивается:

1) Среднее арифметическое отклонение

$$\rho = \frac{1}{N_0} (t_1 - \bar{T}_{cp} \cdot n_1 + \dots + t_i - \bar{T}_{cp} \cdot n_i) = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^k (t_i - \bar{T}_{cp}) \cdot n_i = 26 \text{ млн.т. бр}$$

2) Дисперсия

$$D_i = \frac{1}{N_0} [(t_1 - \bar{T}_{cp})^2 \cdot n_1 + \dots + (t_i - \bar{T}_{cp})^2 \cdot n_i] = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^k (t_i - \bar{T}_{cp})^2 \cdot n_i = 1076 \text{ (млн.т)}^2$$

3) Среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_i = \sqrt{D_i} = \sqrt{1076} = 32,8 \text{ млн.т. бр.}$$

4) Коэффициент вариации

$$V_t = \frac{\sigma_i}{T_{cp}} = \frac{32,8}{122} = 0,27$$

Чем меньше v_t , тем плотнее группируются признаки вокруг среднего, и тем меньше рассеивание.

Испытав выборку, можно распространить результаты этих исследований с некоторой точностью на другие крестовины этой же марки, эксплуатируемые в тех же (или схожих) условиях.

Результаты испытаний могут дать возможность найти математическое описание полученных закономерностей и вывести соответствующие формулы по которым можно вычислить показатели надежности. Эти формулы - математические модели.

Этими моделями являются законы распределения случайных величин, рассмотренные на предыдущей лекции.

Контрольные вопросы

1. Оценка надежности объекта.
2. Последовательность сбора и обработки информации о надежности.
3. Цель статистической обработки данных о отказах.
4. Пример определения параметров надежности.
5. Параметры рассеивания результатов испытаний.
6. Оценка параметров рассеивания.
7. Математические модели и параметры надежности. Связь между ними.

Лекция №7: **РАСЧЕТ СХЕМНОЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ.
ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ.**

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Расчет надежности систем по надежности элементов.
2. Надежность рельсовых креплений.
3. Вероятность безотказной работы узла крепления как сложной системы.
4. Путь – как система с резервными нагруженными элементами.

Литература, используемая в лекции

1. Проников А.С. Надежность машин. М. : , 1978.
2. Карпущенко Н.И., Тарнопольский Г.И. Надежность железнодорожного пути. НИИЖТ связей рельсов с основанием. М. : Транспорт, 1986.
3. Карпущенко А.С. Надежность связей рельсов с основанием. М. : Транспорт, 1986.

7.1. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ПО НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ

При возможности расчленения сложной системы на отдельные элементы, для каждого из которых возможно определить вероятность безотказной работы, для расчета надежности широко используют структурные схемы.

Наиболее характерен случай, когда отказ одного элемента выводит из строя всю систему, как это имеет место в случае последовательно соединенных элементов (см.рис.)

Вероятность безотказной работы такой системы равна произведению вероятностей безотказной работы элементов

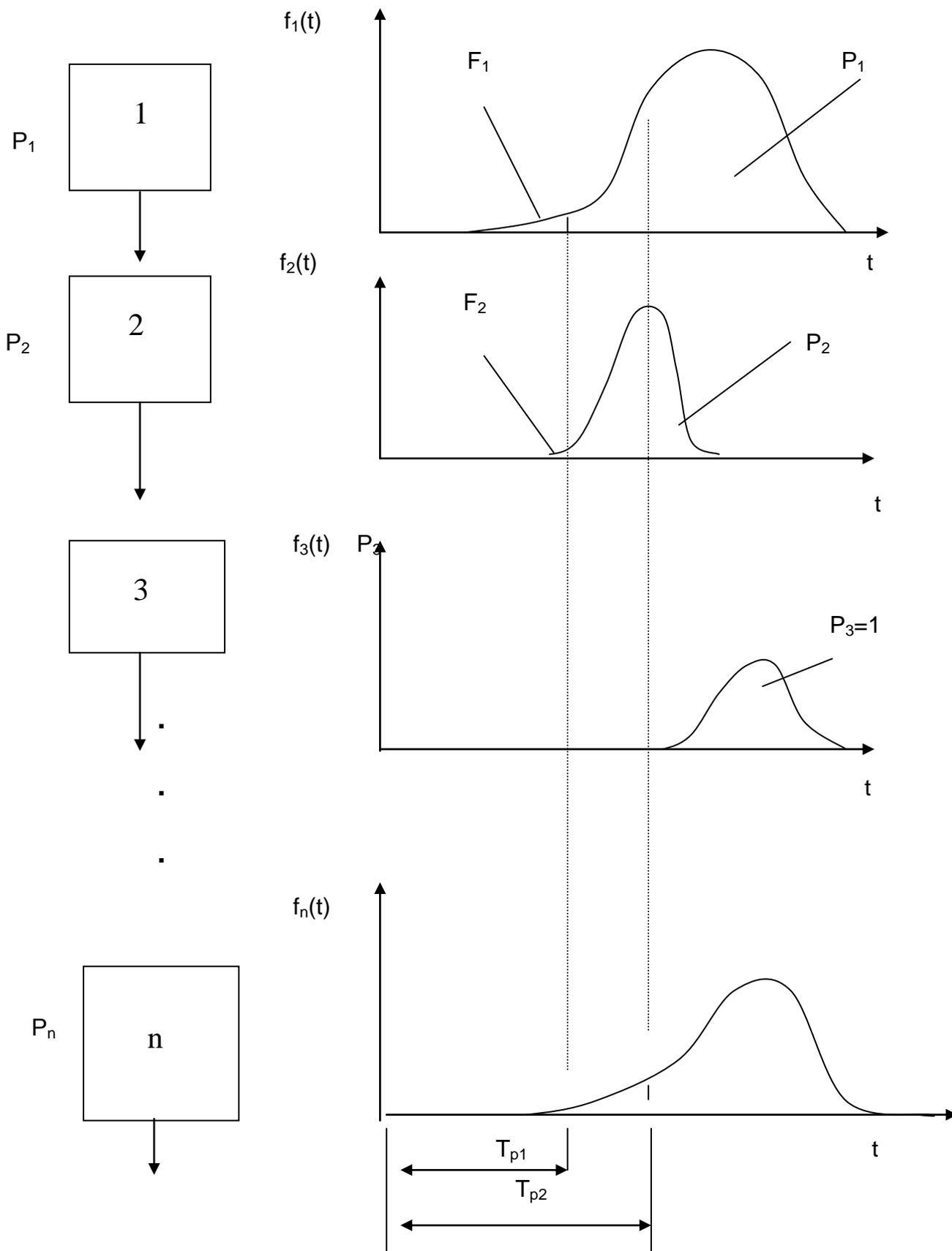
$$P(t) = P_1 P_2 \dots P_n = \prod_{i=1}^n P_i$$

Сложные системы, состоящие из элементов высокой надежности, могут обладать низкой надежностью за счет большого числа элементов. Например:

$$N = 50 \quad ; \quad P_i = 0$$

$$P(t) = (0,99)^{50} \approx 0,55.$$

Схема формирования P_i для элементов сложной системы.



7.2. НАДЕЖНОСТЬ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ

При рассмотрении надежности рельсовых креплений рассматриваются структурные схемы, включающие последовательно и параллельно соединенные элементы. В условиях нормальной работы все элементы считаются соединенными последовательно:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i ;$$

Отдельные цепи элементов можно считать соединенными параллельно

$$P(t) = 1 - (1 - \prod_{i=1}^n P_i)^2$$

Для “стареющих” элементов в качестве распределения интервала безотказной работы используют обычно нормальное распределение. При этом

$$P(t) = 1 - [F_0(t - T_{cp} / \sigma_t) + F_0(T_{cp} / \sigma_t)]$$

где T_{cp} - средняя наработка до отказа,

σ_t - среднее квадратическое отклонение безотказной работы

T_{cp} и σ_t можно определить по методу квантилей с помощью метода наименьших квадратов. Например: наработка для отказавших элементов t_1, t_2, \dots, t_r , исправное число элементов n -г.

По вероятности выхода, $F_i(t) = r_i(t) / N_0$, определяем квантиль нормального распределения и составляем r уравнений, которую решаем по методу наименьших квадратов

$$\begin{aligned} T_{cp} + U_{p_1} * \sigma_t &= t_1 \\ T_{cp} + U_{p_2} * \sigma_t &= t_2 \\ T_{cp} + U_{p_3} * \sigma_t &= t_3 \\ &\dots \\ T_{cp} + U_{p_r} * \sigma_t &= t_r \end{aligned}$$

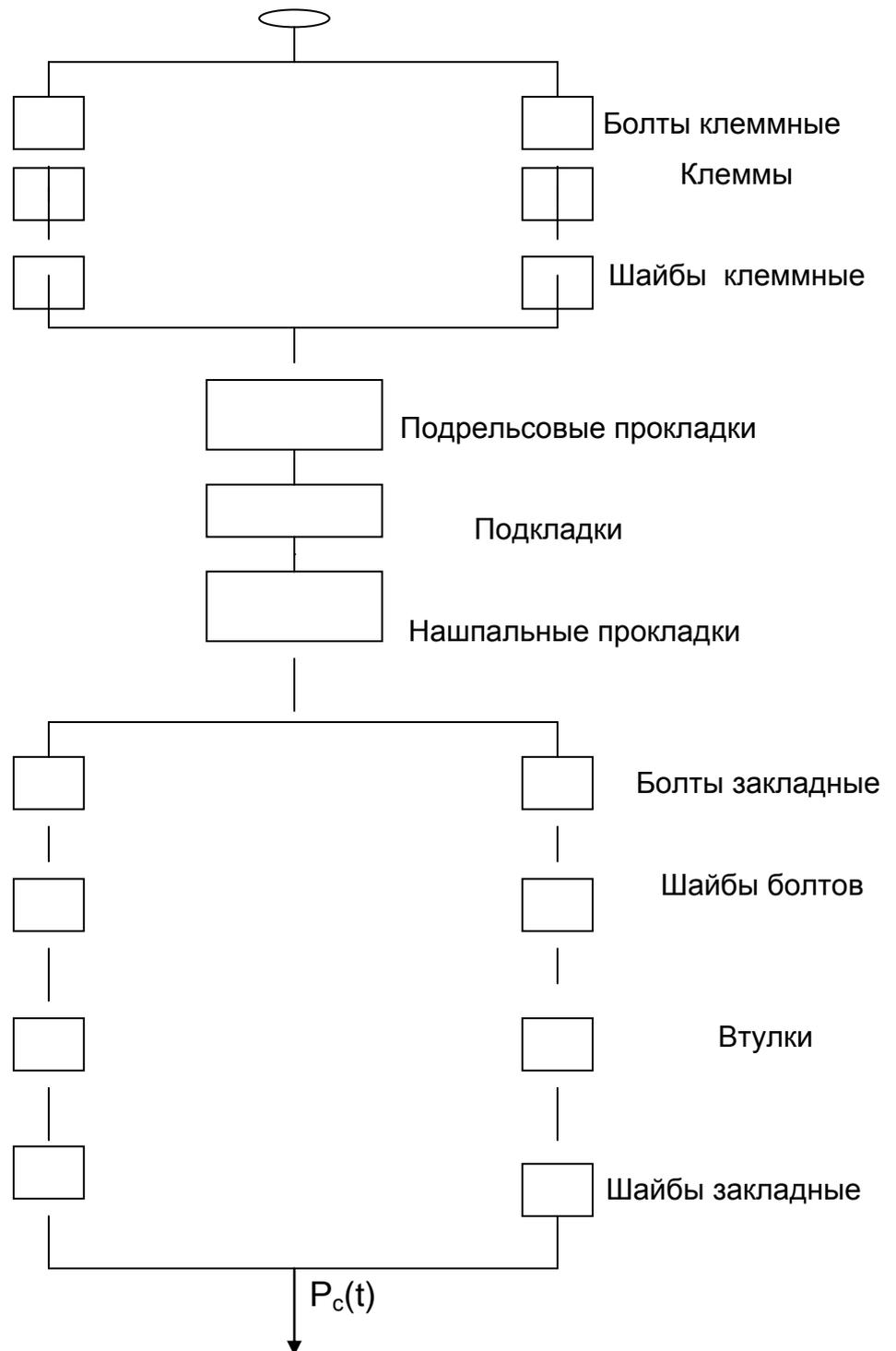
Уравнения решаются относительно неизвестных T_{cp} и σ_t .

Пример приведен для расчета T_{cp} и σ_t промежуточных креплений типа КБ-65

| Элементы креплений | T_{cp} | σ_t |
|------------------------|----------|------------|
| Подкладки | 761 | 229 |
| Болты клеммные | 5807 | 1473 |
| Клеммы | - | - |
| Шайбы клеммных болтов | 2615 | 962 |
| Болты закладные | 1550 | 382 |
| Шайбы закладных болтов | 2380 | 813 |
| Втулки короткие | - | - |
| Втулки удлиненные | 2106 | 1019 |
| Подкладки подрельсовые | 493 | 101 |
| Прокладки нащпальные | 703 | 197 |

7.3. ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ УЗЛА СКРЕПЛЕНИЯ.

Перейдем к определению вероятности безотказной работы узла скрепления. Ниже приведена структурная схема анализа надежности скрепления типа КБ-65



При параллельном соединении отказ системы происходит, только когда откажут все параллельные участки схемы.

При этом

$$P(t) = 1 - (1 - \prod_{i=1}^n P_i)^2 \quad \text{или}$$

$$P_y = [1 - (1 - \prod_{i=1}^3 P_i)^2] * [1 - (1 - \prod_{i=1}^4 P_i)^2] \prod_{i=1}^3 P_i$$

Получены следующие значения $P_y(t)$

| Тоннаж, Млн. тонн | 100 | 200 | 350 | 500 | 600 |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $P_y(t)$ | 0,9968 | 0,9838 | 0,8757 | 0,6498 | 0,3962 |

Из таблицы следует, что $P(t)$ скреплений типа КБ-65 очень низка уже при $T > 300$ млн.т.

Однако отказ узла одного скрепления не означает отказа связей рельса с основанием. Пояснение ниже.

7.4. ПУТЬ - КАК СИСТЕМА С РЕЗЕРВНЫМИ НАГРУЖЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ.

Согласно нормативным документам поперечная устойчивость рельсовых нитей и всей решетки обеспечивается, если нет пустот из 3х негодных шпал, а рельсовая нить не расшита на трех шпалах подряд.

Т.е. систему можно рассматривать как цепь последовательно соединенных элементов, каждый из которых имеет по 2 резервных нагруженных элемента.

Тогда число элементов на звене

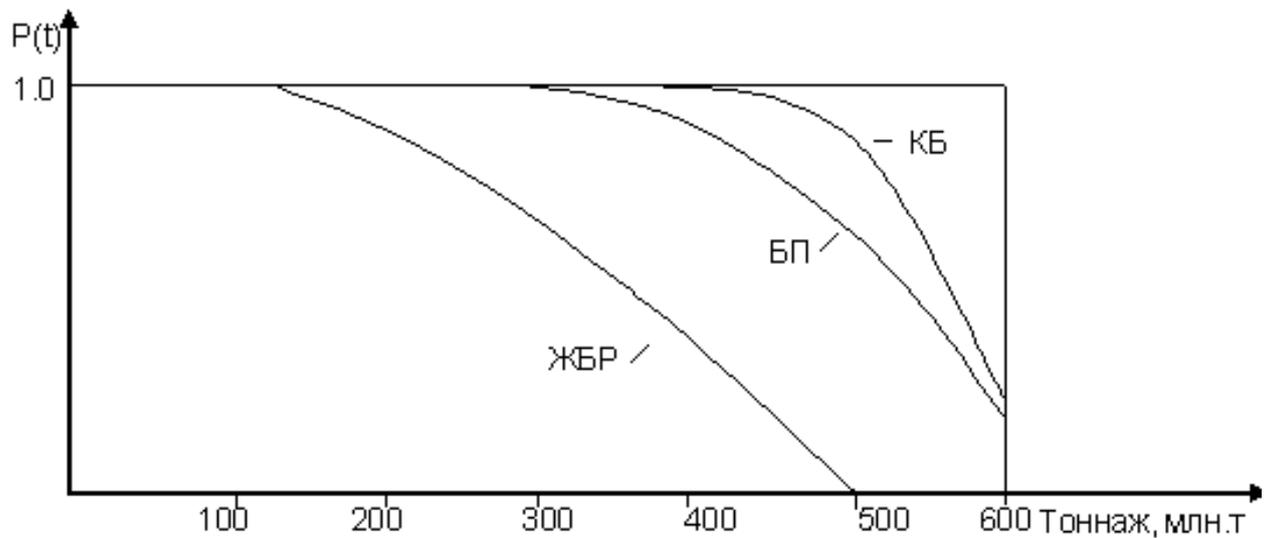
$$S = n / 3$$

где n - число шпал на звене.

Тогда вероятность безотказной работы поперечных связей на звене:

$$P_c(t) = [1 - (1 - P_y(t))^3]^5$$

Результаты расчетов приведены на рис.



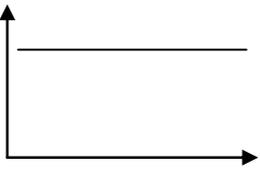
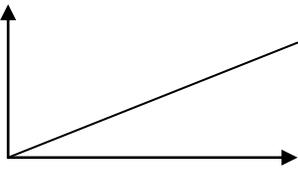
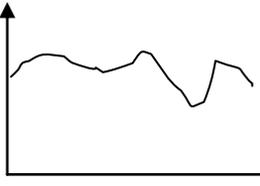
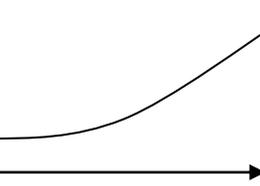
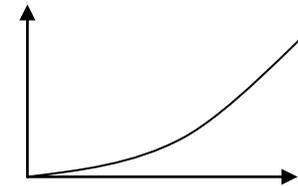
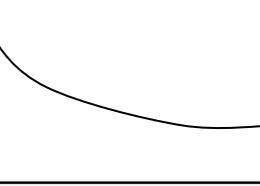
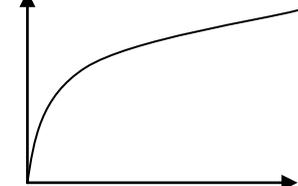
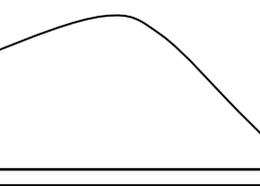
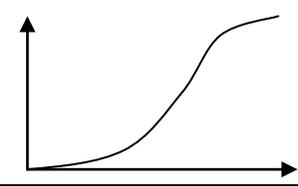
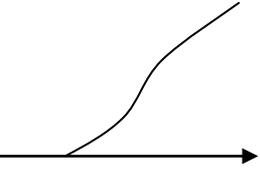
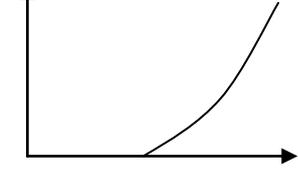
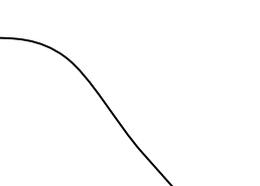
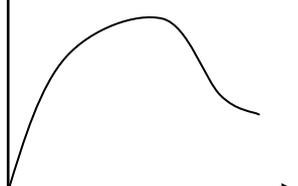
Т.е. по участку со скреплениями типа КБ можно пропустить не менее 350 млн.т. брутто без существенного обновления элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проников А.С. Надежность машин М, 1978
2. Карпущенко Н.Н., Тарнопольский Г.И. Надежность железнодорожного пути НИИЖТ, 1989
3. Карпущенко А.С. Надежность связей рельсов с основанием. М, транспорт, 1986.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Система с последовательными связями.
2. Определение $P(t)$ для сложной системы.
3. Схема формирования $P(t)$ для сложной системы.
4. Расчет $P(t)$ при параллельном соединении элементов системы.
5. Определение $T_{ср}$ и σ_t (последовательность)
6. Структурная схема узла скрепления.
7. Определение $P(t)$ для скрепления типа КБ-65.
8. Анализ надежности скреплений типа КБ-65.
9. Схема расчета пути как системы из последовательно соединенных элементов с резервными нагруженными элементами.
10. Сравнительный анализ надежности скреплений типа КБ-65, БП-65, ЖБР-65.

| Процессы по оценке скорости протекания γ | $\gamma (t)$ | $U (t)$ |
|--|---|--|
| Постоянные (износ) |  |  |
| Псевдостационарные (износ при переменных режимах) |  |  |
| Возрастающие (при засорении поверхностей)] |  |  |
| Убывающие (износ в период приработки) |  |  |
| Экстремальные (с max; min) коррозия |  |  |
| С запаздыванием (усталость, хрупкое разрушение) |  |  |
| Знакопеременные (изменение механических характеристик) |  |  |

О процессах старения можно судить непосредственно по изменениям выходных параметров, т.е. по измерениям напряженно-деформированного состояния пути в

конкретных условиях эксплуатации. Численные характеристики процессов изменения этих параметров могут быть получены с помощью проводимых в течение межремонтного периода экспериментов.

Удобной моделью процессов старения часто бывают линейные случайные процессы:

$$Y(t) = A + B \times t \text{ - линейная функция}$$

где $Y(t)$ - выходной параметр

A - начальное значение параметра; B - скорость изменения параметра.

При этом математическое ожидание и дисперсия линейной случайной функции определяется выражением:

$$m_Y(t) = m_a + m_b \times t$$

$$D_Y(t) = D_a + 2t \times k + D_b t^2$$

где m_a , m_b , D_a , D_b - математическое ожидание и дисперсия соответственно начального значения и скорости изменения выходного параметра.

k_{ab} - корреляционный коэффициент.

Д.1.2. МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСТЕПЕННЫХ ОТКАЗОВ

При известных характеристиках случайных процессов изменения выходных параметров системы, можно найти распределение наработки до отказа.

При этом закон распределения плотности вероятности $f(t) = F^1(t) = -P^1(t)$ и функции распределения

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \text{ - полностью характеризуют надежность системы.}$$

Ниже показана схема формирования распределения $f_y(t)$ для случая, когда изменение выходного параметра $Y(t)$ описывается линейной случайной функцией

$$Y(t) = A + B(t)$$

При $t = 0$ наблюдается рассеивание выходного параметра системы $f_a(y)$ относительно математического ожидания m_a .

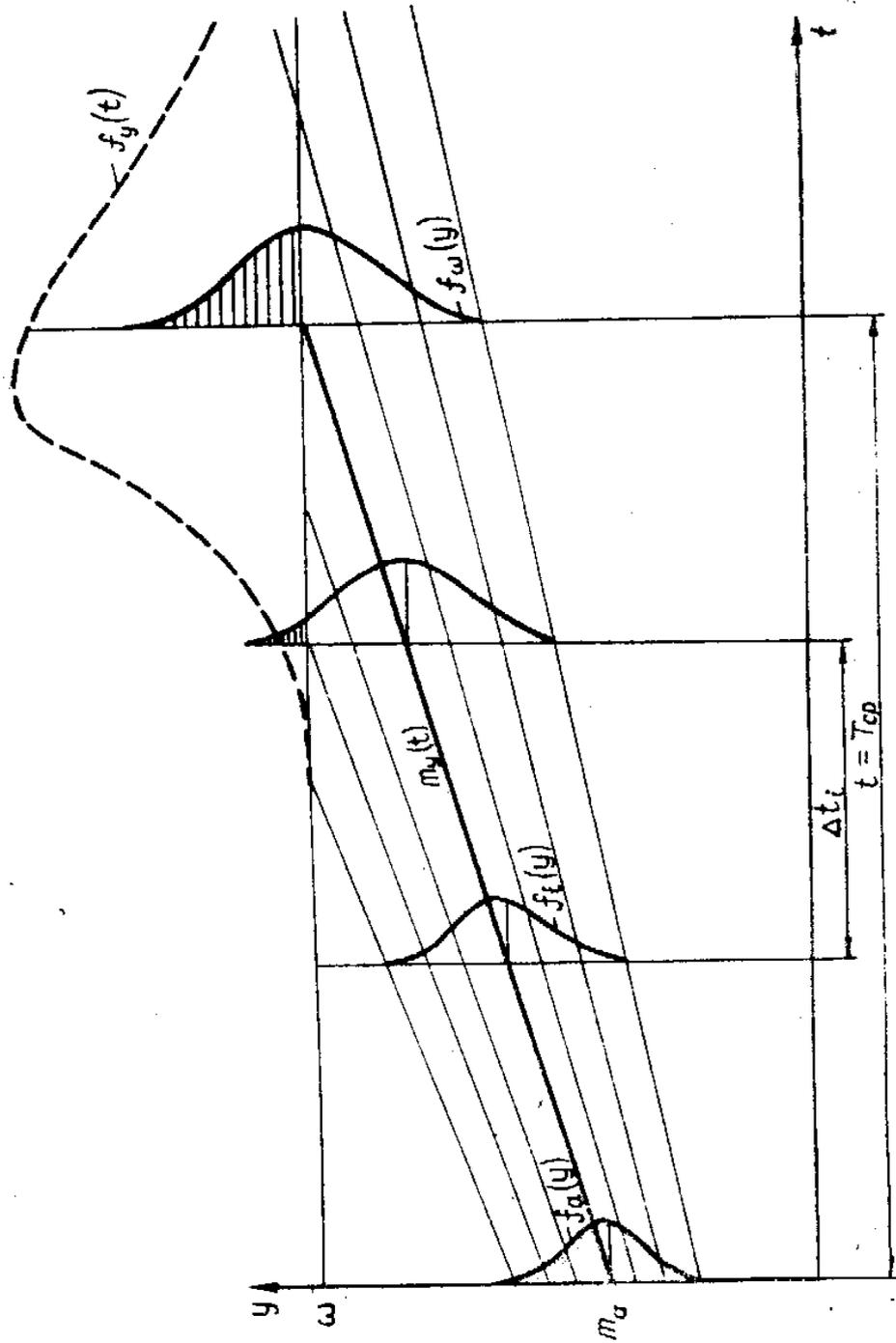


Схема формирования постепенных отказов

Далее назначения выходного параметра $Y(t)$ оказывают влияние процессы старения.

Отказы возникают тогда, когда отдельные значения $Y(t)$ пересекают область допустимых значений ω .

Вероятность отказа равна заштрихованной площади $f_i(Y)$.

Если случайные аргументы процесса, описываемые функцией типа $Y(t) = A + B \times t$

распределены по нормальному закону, то и выходной параметр $Y(t)$ также распределяется по нормальному закону.

Д.1.3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА

При нормальном законе распределения

$$f_i(y) = \frac{C}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{yi}} \exp \left[-\frac{(y - m_{yi})^2}{2\sigma_{yi}^2} \right]$$

где m_{yi} и σ_{yi} - максимальное ожидание и среднее квадратическое отклонение значений

выходного параметра в момент t_i

C - нормирующий множитель.

Производя ряд преобразований и с учетом того, что

$$m_y(t) = m_a + m_b \cdot t$$

$$\sigma_y(t) = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2 \cdot t^2}$$

(где $m_a, \sigma_a, m_b, \sigma_b$ - математические ожидания и средние квадратические отклонения случайных величин a и b).

Получим окончательное выражение для определения вида распределения наработки до отказа для конкретного случая:

$$f_y(t) = \frac{-m_b(\sigma_a^2 + \sigma_b^2 t^2) + \sigma_b^2 \cdot t(m_a + m_b \cdot t - \omega)}{\sqrt{(\sigma_a^2 + \sigma_b^2 t^2)^3} \cdot \sqrt{2\pi}} \exp x$$

$$x \left[-\frac{(\omega - m_a - m_b \cdot t)^2}{2(\sigma_a^2 + \sigma_b^2 \cdot t^2)} \right]$$

Д.1.4. ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ОБЪЕКТА

Это состояние характеризует выход объекта из области работоспособности. Требования к параметрам пути регламентируются нормативными документами (ПТЭ, инструкции, ТУ и т.д.).

При достижении предельного состояния элемент должен быть заменен (или выполнены необходимые работы).

Наиболее распространенный вид области работоспособности, используемый в теории надежности, характеризуется предельной границей, выход за которые является отказом. Многие параметры конструкции пути имеют допуски.

Несущая способность элементов и узлов верхнего строения пути характеризуется параметрами со случайными разбросами. Поэтому для ее описания следует применять случайные функции.

Контрольные вопросы

1. Определение старения.
2. Виды старения объекта.
3. Типовые графики процесса старения.
4. Факторы, влияющие на интенсивность старения.
5. Модель формирования постепенных отказов.
6. График выходного параметра с учетом процесса старения.
7. Определение наработки до отказа (пример для нормального закона распределения $f_y(t)$).
8. Определение предельного состояния.
9. Области работоспособности для железнодорожного пути.

Д.2. ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Отказы пути. Схема оценки надежности.
2. Методы прогнозирования надежности.
2. Алгоритм расчета $m(t)$, $F(t)$, $P(t)$. Н

Литература, используемая в лекции

1. Карпущенко Н.И., Тарнопольский Г.И. Надежность железнодорожного пути. Новосибирск, 1989.
2. Проников А.С. Надежность машин. М., 1878.

Д.2.1. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Прогнозирование отличается от расчета тем, что решается вероятностная задача, в которой поведение сложной системы в будущем определяется лишь с той или иной степенью достоверности и оценивается вероятность ее нахождения в определенном состоянии при различных условиях эксплуатации.

Применительно к надежности задача прогнозирования сводится в основном к предсказанию вероятности безотказной работы $P(t)$ в зависимости от различных режимов работы и условий эксплуатации.

Для прогнозирования в общем случае применяются разнообразные методы с использованием:

- моделирования;
- аналитических расчетов;
- статистической информации;
- экспертных оценок;
- метода аналогий;
- анализа и т.д.

Основным методом для прогнозирования надежности сложных систем является оценка изменения его выходных параметров во времени при различных входных данных.

Изменение выходного параметра может происходить до определенного предельного значения:

$$\eta(t) \leq \eta_{np}$$

где η_{np} - предельное значение параметра по критерию опасности или эффективности функционирования системы (по ПТЭ, ТУ или из экономических соображений).

В общем случае изменение выходного параметра как случайной функции наработки выглядит так:

$$\eta(t) = a + \alpha T^\beta$$

где a - характеристика выходного параметра после обновления (капитального ремонта) пути. В связи с тем, что

$$a \ll \eta_{пр} \quad \text{принято } a = 0$$

$$\text{т.е. } \eta(t) = \alpha T^\beta$$

α - параметр, зависящий от конструкции пути и условий работы (при коэффициенте вариации $v_\alpha = 0,1 \div 0,4$ можно считать, что α подчиняется нормальному закону; при $v_\alpha > 0,4$ - распределению Вейбулла).

β - детерминированный параметр.

Ниже приведена упрощенная модель процесса изменения выходного параметра $\eta(t)$. Случайные величины наработки до отказа имеют плотность распределения $f(t)$.

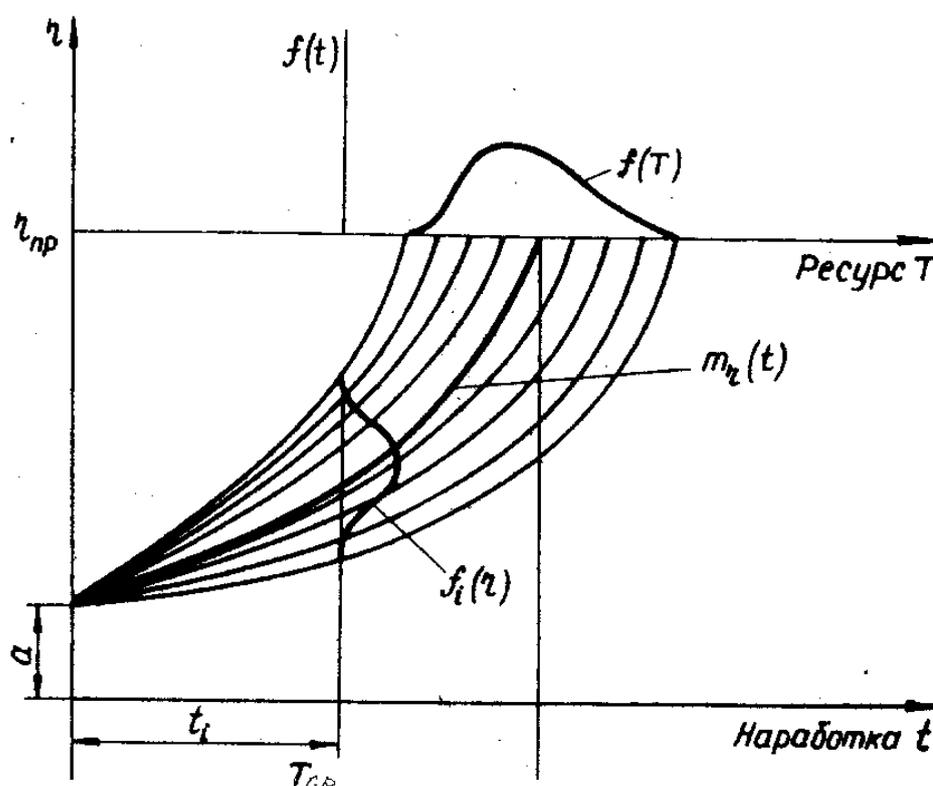


Рис 10.1

Схема формирования отказов при нелинейной зависимости определяющего параметра от наработки

Наработка до отказа:

$$T = \left(\frac{\eta_{пр}}{\alpha}\right)^{1/\beta} \quad \text{или } T = \varphi(\alpha)$$

Выражение для плотности вероятности может быть получено из известного соотношения

$$f(t) = f[\alpha(t)] \times \left| \frac{d\alpha}{dt} \right|, \text{ где}$$

$\alpha(t)$ - функция обратная $T = \varphi(\alpha)$:

$$\alpha(t) = \frac{\eta_{np}}{T^\beta}; \quad \frac{d\alpha}{dt} = -\frac{\eta_{np}\beta}{T^{\beta+1}}$$

Предполагая, что α подчиняется усеченному закону распределения можно записать

$$f(\alpha) = \frac{C}{S_\alpha \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\alpha - m_\alpha)^2}{2 \cdot D_\alpha}\right], \quad 0 < \alpha < \infty$$

$$\text{где } C = F_0\left(\frac{m_\alpha}{S_\alpha}\right)^{-1};$$

$F_0(I)$ - табулированная нормальная функция распределения;

S_α и D_α - стандартное отклонение и дисперсия коэффициента α^n . Тогда получим

$$f(t) = \frac{C \cdot \beta \cdot \eta_{np}}{T^{\beta+1} \cdot S_\alpha \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\frac{\eta_{np}}{T^\beta} - m_\alpha)^2}{2S_\alpha^2}\right]$$

Математическое ожидание и дисперсия ресурса

$$T_{cp} = \varphi(m_\alpha) = \left(\frac{\eta_{np}}{m_\alpha}\right)^{1/\beta}$$

$$D_T = [\varphi'(m_\alpha)]^2 D_\alpha = \frac{\eta^{2/\beta} \cdot D_\alpha}{\beta^2 (m_\alpha)^{2/\beta+2}}$$

Функцию надежности (вероятность того, что наработка до отказа T будет не менее заданной наработки $(0, t)$ определим из выражения:

$$P(t) = \int_t^\infty f(t) dt \text{ или}$$

$$F(t) = 1 - P(t) = \int_0^t f(t) dt \text{ или}$$

$$F(t) = \int_0^t \left[\frac{C \cdot \beta \cdot \eta_{np}}{T^{\beta+1} S_\alpha \sqrt{2\pi}} \right] \exp\left[-\frac{(\frac{\eta_{np}}{T^\beta} - m_\alpha)^2}{2S_\alpha^2}\right]$$

Или приняв $Z = \frac{\eta_{np}/T^\beta - m_\alpha}{S_\alpha}$ получим

$$F(t) = \frac{C}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = C \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} \cdot dz - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz \right) =$$

$$= C \left[1 - F_0 \left(\frac{\frac{\eta_{np}}{T^\beta} - m_\alpha}{S_\alpha} \right) \right]$$

где $F_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ - табулированная нормальная функция распределения.

Вероятность безотказной работы:

$$P(t) = 1 - F_0(t) = (1 - C) + C * F_0 \left[\left(\frac{\eta_{np}}{T^\beta} - m_0 \right) / S_\alpha \right]$$

Так как на практике $C \approx 1$, то

$$P(t) \approx F_0 \left[\left(\frac{\eta_{np}}{T^\beta} - m_\alpha \right) / S_\alpha \right].$$

Параметры m_α ; S_α , β определяются на основании обработки статистических данных, собранных с конкретного участка пути.

Д.2.2. Алгоритм расчета $m_\eta(t)$, $D_\eta(t)$, $F(t)$, $P(t)$.

Дано: результаты об отказах рельсов на каждом из n километров нарастающим итогом и получено n реализаций функции $\eta_i(t)$.

Найти: - математическое ожидание $m_\eta(t)$;

- дисперсию $D_\eta(t)$;

-

- вероятность безотказной работы при любом T .

-

Обычно t_i задают равноотстоящими или соответствующими приросту тоннажа за год.

Получаем ряд случайных величин

$$\eta(t_1), \eta(t_2), \dots, \eta(t_m).$$

Алгоритм расчета приведен ниже.

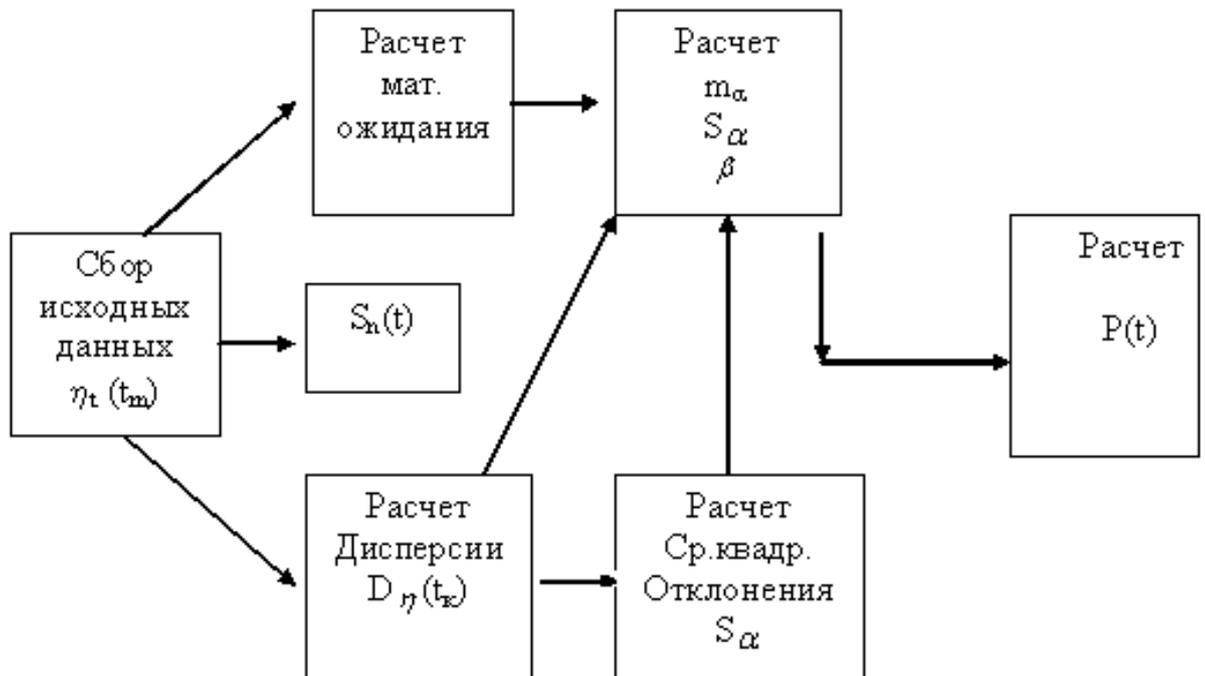
$$\bar{m}(t_k)_\eta - \text{математическое ожидание};$$

$\bar{D} \eta (t)$ – дисперсия.

Таблица сбора исходных данных

| Реализация $\eta (t)$ по километрам | Тоннаж, млн. т. брутто | | | | | |
|---|------------------------|----------------|-------|------------------|-------|------------------|
| | T_1 | t_2 | | t_k | | t_m |
| $\eta_1 (t)$ | $\eta_1 (t_1)$ | $\eta_1 (t)$ | | $\eta_1 (t_k)$ | | $\eta_1 (t_m)$ |
| $\eta_2 (t)$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| $\eta_i (t)$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| $\eta_n (t)$ | | | | | | |

Алгоритм определения расчетных параметров



Контрольные вопросы

1. Классификация отказов пути.
3. Цель сбора данных об отказах.
4. Схема оценки надежности пути на ГАЖК «УТЙ».
5. Отличие прогнозирования и расчета надежности
6. Методы прогнозирования.
7. Метод прогнозирования сложных систем.
8. Функция выходного параметра
9. Модель изменения выходного параметра.
10. Порядок определения T_{cp} и D_T .
11. Определение $F(t)$, $P(t)$
12. Алгоритм расчета $m_{\eta}(t)$, $D_{\eta}(t)$, $F(t)$, $P(t)$ на примере выхода рельсов.

Д.3.ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЛЬСОВ.

План лекции

1. Анализ отказов рельсов.
 2. Общие принципы теории надежности железнодорожных рельсов.
 3. Вероятностная модель накопления усталостных повреждений в рельсах.
- Литература, используемая в лекции

Литература

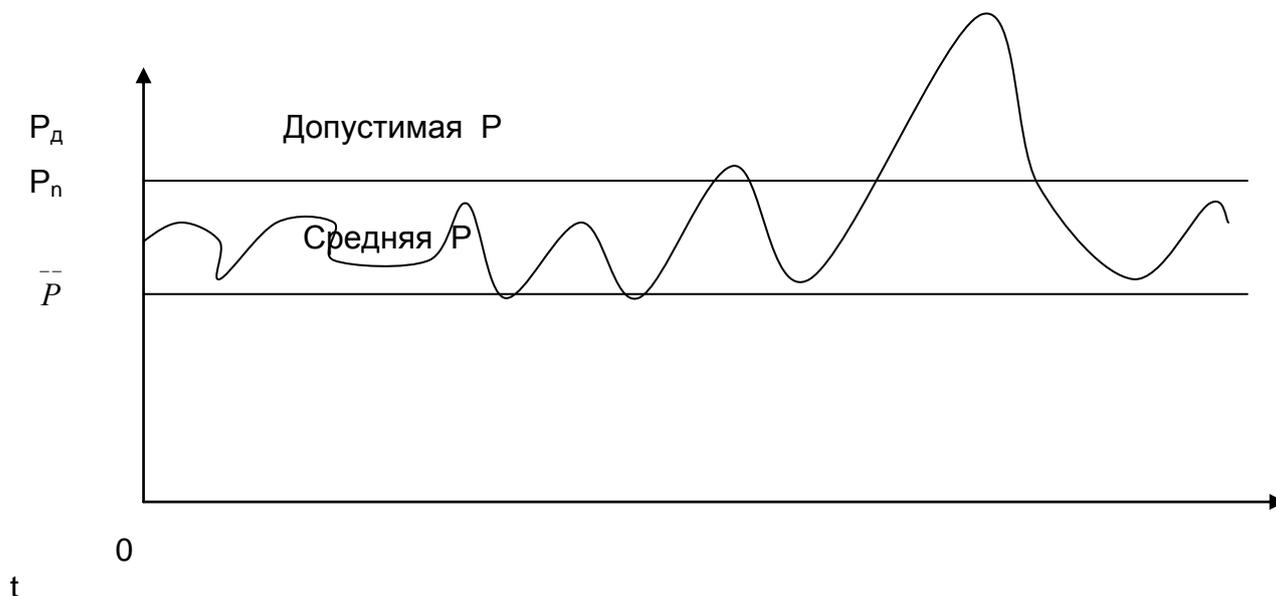
1. Карпущенко Н.И., Тарнопольский Г.И. Надежность железнодорожного пути.
 2. Шур А.Я. Повреждение рельсов. М.: Транспорт, 1986.
- 12.1. Анализ отказов рельсов.

Д.3.1. Виды отказов рельсов:

- приработочные;
- внезапные;
- постепенные.

Приработочные отказы – износ (крайне редко); технологические нарушения (плены, раковины, волосовины).

Внезапные отказы – в период нормальной эксплуатации в связи с превышением допустимых нагрузок.



Постепенные отказы – возникают ввиду старения рельсов (изменение прочностных характеристик, механический износ, смятие, коррозия, усталость).

Резкий рост выхода после периода нормальной работы определяет необходимость сплошной смены рельсов (см. лекцию № 2 – 3).

Процентное соотношение отказов:

- приработочные - до 2% ($0,8 \div 1 \%$).
- внезапные - до 4% ($1 \div 2,5\%$).
- износосвые - до 7% ($2 - 4\%$).
- усталостные - до **97%** (**90 – 95%**).

Д.3.2. Общие принципы теории надежности железнодорожных рельсов.

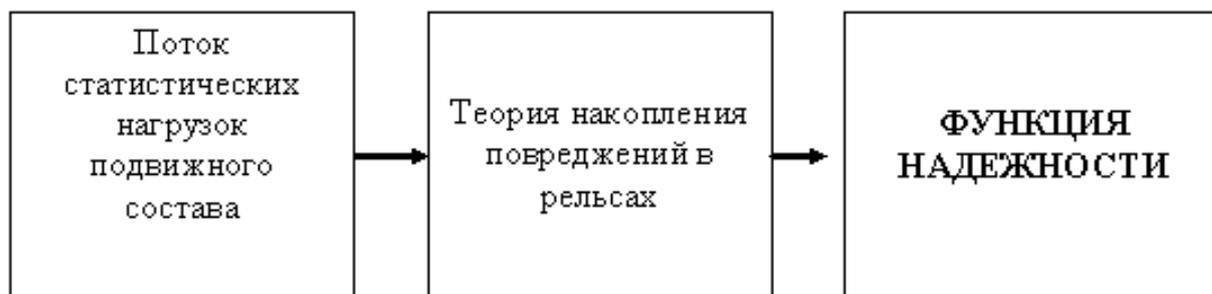
Усталостные разрушения зависят:

- От случайного процесса нагружения.
- От случайных прочностных свойств конструкции пути.

СХЕМА ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ РЕЛЬСОВ

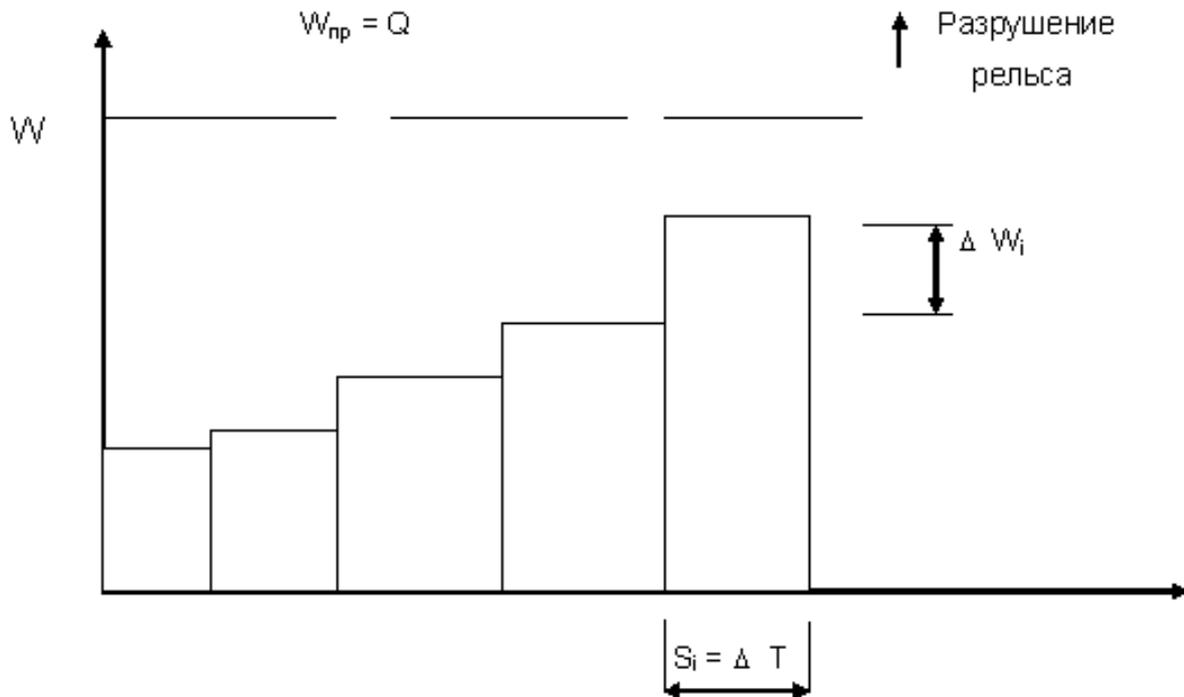


Такая схема сложнореализуемая, поэтому используется упрощенная:



Д.3.3. ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В РЕЛЬСАХ

Ниже приведена схема усталостных повреждений в рельсах в зависимости от тоннажа



W – накопление усталостных напряжений.

Долговечность определяется тоннажом при котором $W_{пр} = Q$ – предельное значение накопленного повреждения.

N – число пропущенных осей.

S – осевая нагрузка.

T – пропущенный тоннаж.

$$M T = \mu * M N, \Delta T_i = S_i = T_i - T_{i-1}$$

Вычислим математическое ожидание и дисперсию числа прошедших осей, соответствующих тоннажу T_i из теории вероятностей имеем:

$$P (N > N_i) = P (T < T_i)$$

Математическое ожидание $M T_i$ и дисперсия $\sigma^2 T_i$ тоннажа T_i :

$$M T_i = \mu_s * N_i; \sigma^2 T_i = \sigma_s^2 N_i$$

Где μ_s и σ_s^2 – среднее значение и дисперсия осевых нагрузок

$$P (N > N_i) = P (T_i < T) = P (T_i - T < 0) \rightarrow \Phi (U)$$

Где $\Phi (U)$ – функция Лапласа

U – нормированная величина

$$U = \frac{T - \mu_s * Ni}{\sigma_s * \sqrt{Ni}}, \text{ откуда}$$

$$N = \frac{T}{\mu_s} + U \sqrt{\sigma_s^2 T / \mu_s^3}, \text{ откуда}$$

$$P(N - T / \mu_s / \sqrt{T - \sigma_s^2 / \mu_s^3}) \rightarrow \Phi(U)$$

$$\text{T.e. } MN = T / \mu_s, \quad \sigma^2 N = \sigma_s^2 T / \mu_s^3$$

μ_s и σ_s^2 – определяются по маршрутным листам.

$$MT = Q / \mu_w * \mu_s; \quad \sigma^2 T = Q * \mu_s^2 * \sigma_w^2$$

Где σ_w^2 – дисперсия процесса накопления остаточных усталостных повреждений.
Это модель соответствует нормальному распределению

$$\mu_w = \mu_s^m$$

m – экспериментальный параметр

$$MT = Q / \mu_s^{m-1}; \quad \sigma^2 T = \sigma_w^2 * Q / \mu_s^{3m-2}.$$

По этим формулам определяются параметры долговечности в зависимости от средних осевых нагрузок.

Учет кривых производится путем статистических экспериментов и введением коэффициента редукации:

$$\eta = M T_{пр} / M T_{кр}$$

$$MT = Q / (\eta \mu_s)^{m-1}; \quad \sigma^2 T = Q * \sigma_w^2 / (\eta \mu_s)^{3m-2}$$

Величины Q , σ_w^2 , m , η определяются из статических экспериментов.

Если требуется найти влияния повышения осевых нагрузок на долговечность, то учитываются следующие нагрузки отдельно:

S_1 – осевая нагрузка порожних вагонов;

S_2 – то же грузовых вагонов с большеобъемными грузами;

S_3 – то же пассажирских вагонов;

S_4 – то же грузовых вагонов с сыпучими и наливными грузами;

S_5 – то же локомотивов.

Тогда

$$\mu_w = S_1^m \tau_1 + S_2^m \tau_2 + S_3^m \tau_3 + S_4^m \tau_4 + S_5^m \tau_5 / T_0 = \sum_{i=1}^5 S_i^m \alpha_i$$

где τ_i – соответствующие тоннажи;

T_0 – тоннаж ;

α_i – длительность, $\alpha_i = \tau_i / T_0$.

В этом случае расчетные формулы выглядят так:

$$Q = \frac{MT}{M_s} \sum_{i=1}^r S_i^m \cdot \alpha_i;$$

$$\sigma_w^2 = \frac{\sigma^2 T}{Q \mu_s} \left(\sum_{i=1}^s S_i^m \cdot \alpha_i \right)^2$$

Таким образом *окончательные* параметры можно получить подставив полученные значения в ранее приведенные формулы:

$$MT = \frac{Q}{\mu_w} \cdot \mu_s;$$

$$\sigma^2 T = \frac{Q \cdot \mu_s^2 \cdot \sigma_w^2}{\mu_w^3}$$

$$\text{где } \mu_w = \sum_{i=1}^5 S_i^m \cdot \alpha_i$$

Контрольные вопросы

1. Виды отказов рельсов.
2. График внезапного отказа.
3. Определение приработочного отказа.
4. Постепенный отказ.
5. Причины усталостных разрушений.
6. Схема физической теории надежности рельсов.
7. Упрощенная схема физической теории.
8. Модель накопления усталостных разрушений в рельсах.
9. Математическое ожидание и дисперсия тоннажа – как параметры долговечности.
10. Коэффициент редукации.
11. Учет повышенных осевых нагрузок.

