Лабораторная работа №1
Методика сбора и обработки данных о надёжности элементов автомобиля

Как уже отмечалось, под влиянием условий эксплуатации, квалификации персонала, неоднородности состояния самих изделий, качества ТО и ремонта и ряда других факторов интенсивность и характер изменения параметров технического состояния у разных автомобилей будет различным. Поэтому если зафиксировать значение параметра, например, на уровне $Y_{пд}$ (рис.1), то моменты достижения этого состояния (ресурса) l_p будут различны – t_1, t_2, t_3 и т.д., т.е. наработка на отказ будет иметь вариацию (рассеивание).

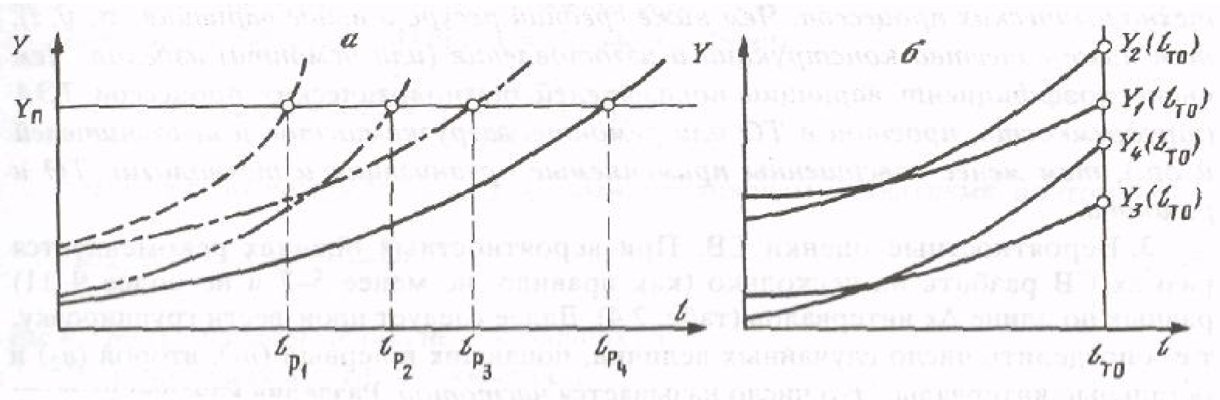

Рис.1. Вариации случайных величин:
а) – наработки при фиксации предельного значения параметра Yп;
б) - параметр технического состояния при фиксации наработки *L*

Другими словами, момент достижения предельного состояния (наработка на отказ) автомобиля и его основных элементов является величиной случайной (СВ) и носит вероятностный характер и может быть определена только непосредственным испытанием на надёжность и последующей математической обработкой результатов с использованием теории вероятностей и методов статистической обработки случайных величин.

Отказы в процессе эксплуатации автомобиля возникают, как правило, в неопределённое время, образуя в течение достаточно длительного времени поток отказов. Вид потока отказов определяет свойства автомобиля и критерии надёжности, аналитические зависимости между количественными характеристиками надёжности, а также методы её расчёта. Пробег (наработка) между лежащими рядом отказами в потоке является случайной величиной, которую можно определить с помощью теории вероятностей, но только в том случае, если известна функция распределения. В теории надёжности наработка автомобиля до отказа характеризуется дифференциальным законом распределения, который описывает интенсивность отказов по пробегу.

Для нахождения закона распределения случайных величин необходимо располагать достаточно широким статистическим материалом о надёжности агрегатов, узлов и систем автомобилей.

Методика обработки и анализа информации о надёжности сложных систем, в том числе автомобилей, подробно рассмотрена в следующих литературных источниках и сводится к следующему.

Составляется статистический ряд случайных величин (СВ) от 1 до n в порядке возрастания или убывания их абсолютных значений для упрощения дальнейших расчётов:

$$x_1 = x_{min}, \quad x_2, \quad x_3, \quad \ldots \quad x_{n-1}; \quad x_n = x_{max}, \qquad (1.1)$$

где x_{max} и x_{min} - наибольшее и наименьшее значения случайной величины.

Определяется размах случайной величины R,

$$R = x_{max} - x_{min}, \qquad (1.2)$$

Полученный ряд распределения СВ разбивается на N равных по длине интервалов Δx_i. При назначении N можно использовать выражение

$$N = 1 + 3{,}2 * \lg n, \qquad (1.3)$$

где n - число опытных данных.

Некоторые авторы при вероятностных оценках рекомендуют число интервалов брать от 5-7 до 9-11.

Определяется длина интервала A

$$A = \frac{x_{max} - x_{min}}{n}, \qquad (1.4)$$

За начало первого интервала рекомендуют принимать наименьшее значение случайной величины x_{min}.

Найти середины интервалов x_{icp}

$$xi_{cp} = \frac{xi_{max} + xi_{min}}{2}, \qquad (1.5)$$

где i – номера интервалов от 1 до N.

Производится группировка случайных величин, т.е. определяется число СВ, попавших в первый (N_1), второй (N_2) и остальные интервалы. При этом подсчитывается частота m_i появления отдельных величин признака xi в каждом интервале N и определяется частость ω_i:

$$\omega i = \frac{mi}{ni}, \qquad (1.6)$$

где mi – опытная частота в i–ом интервале статистического ряда.

Частость является эмпирической (опытной) оценкой вероятности p, т.е.

при увеличении числа наблюдений частость приближается к вероятности: $\omega i \to pi$. Полученные при группировке СВ сводятся в таблицу.

Таблица 1

Номер интервала	Интервал Δl, тыс.км	Середина интервала l_{cep_j}, тыс.км	Частота, m_i, шт.	Частость, $\omega i \to pi$	Дифференциальная функция распределения $f(x)$	Вероятность Pi^*	Оценка накопленных вероятностей	
							отказа F_i	безотказности R_i
1								
2								
…								
ВСЕГО:								

Построить опытную гистограмму распределения. Для этого по оси абсцисс отложить выбранные интервалы n_i, а по оси ординат – соответствующие им опытные частоты попадания в интервалы m_i (частости ω_i) или вероятности p_i.

В общем виде, **вероятность случайного события** - это отношение числа случаев, благоприятствующих данному событию, к общему числу случаев. В ТЭА *вероятность отказа* (F – failure, отказ, авария, повреждение) рассматривается не вообще, а за определённую наработку x:

$$F(x) = P\{xi \langle x\} \cong \frac{m(x)}{n}, \qquad (1.7)$$

где $m(x)$ – число отказов за наработку x; n – число наблюдений (изделий), или вероятность отказа изделия при наработке x равна вероятности событий, при которых наработка до отказа конкретных изделий xi окажется менее x.

Вероятность безотказной работы R (reliability - безотказность, надёжность, прочность) определяется отношением числа случаев безотказной работы изделия за наработку x к общему числу случаев. Другими словами, отказ и безотказность являются противоположными событиями, поэтому

$$R(x) = P\{xi \geq x\} \cong \frac{n - m(x)}{n}, \qquad (1.8)$$

где $n\text{-}m(x)$ – число изделий не отказавших за x.

Подсчитывается накопленная частота mi путём последовательного прибавления частот очередного интервала и определяется накопленная частость ωi (вероятность отказа F) путём последовательного прибавления частостей очередного интервала, т.е.

$$F(x) = P_1 + P_2 + \ldots + Pi,$$

где i – номер интервала, соответствующий наработке x.

Следующей характеристикой случайной величины является плотность вероятности (например, вероятности отказа) $f(x)$ – функция, характеризующая вероятность отказа за малую единицу времени при работе узла, агрегата, детали без замены. Если вероятность отказа за наработку $F(x) = \dfrac{m(x)}{n}$, то, дифференцируя её при $n=const$, получим плотность вероятности отказа

$$f(x) = \frac{1}{n}\frac{dm}{dx},$$

где $\dfrac{dm}{dn}$ - элементарная "скорость", с которой в любой момент времени происходит приращение числа отказов при работе детали, агрегата без замены.

Так как $f(x)=F'(x)$, то

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(x)dx. \tag{1.9}$$

Поэтому $F(x)$ называют интегральной функцией распределения, а $f(x)$ – дифференциальной функцией распределения.

Так как

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1, \quad \text{а} \quad R(x) = 1 - F(x), \quad \text{то} \quad R(x) = \int_{x}^{+\infty} f(x)dx.$$

Имея значения $F(x)$ и $f(x)$, можно произвести оценку надёжности и определить среднюю наработку до отказа

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx.$$

Дифференциальную функцию распределения $f(x)$ называется также *законом распределения случайной величины*. Знание законов распределения позволяет более точно планировать моменты проведения и трудоёмкость работ по ТО и ремонта, определять необходимое количество запасных частей и решать другие технические и организационные вопросы.

Для построения дифференциальной функции распределения необходимо выполнить следующие вычисления.

9. Рассчитывается математическое ожидание (эмпирический центр группирования) M, около которого концентрируются значения опытных данных, т.е. наработка до отказа большинства автомобилей исследуемой группы

$$M = \sum_{i=1}^{n} l_{i\,cep} * p_i, \tag{1.10}$$

где – *n* число интервалов в статистическом ряду; xi_{cp} – значение середины i-го интервала; p_i – опытная вероятность i-го интервала.

Графическое изображение вероятностей отказа F(x) и безотказной работы R(x) представлено на рис.2, б.

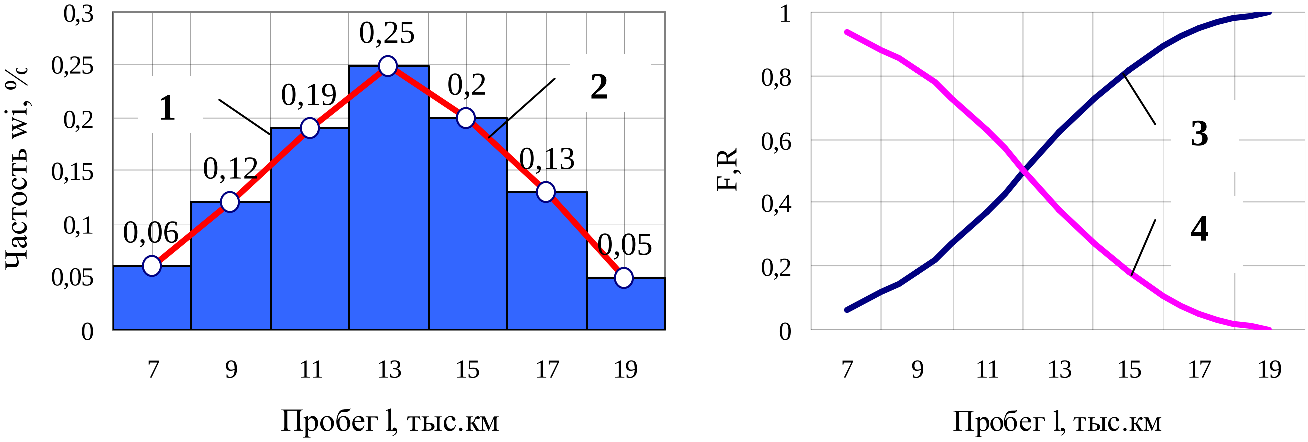

Рис.2. Графическое изображение случайной величины. 1 – гистограмма; 2 – полигон распределения; 3 - интегральная функция вероятности отказов и 4 - безотказной работы

10. Определяется эмпирическое среднеквадратическое отклонение σ, которое характеризуется рассеиванием значений случайных величин в выборке относительно эмпирического центра группирования

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (l_{icep} - M)^2 * pi}\,. \qquad (1.11)$$

11. Вычисляется коэффициент вариации υ, который представляет собой относительную безразмерную величину, характеризующую рассеивание значений случайной величины. Коэффициент вариации

$$\upsilon = \frac{\sigma}{M}\,. \qquad (1.12)$$

Коэффициент вариации υ, полученный в результате обработки экспериментальных данных, служит для предварительного определения закона распределения случайной величины. Например, наиболее часто встречаются следующие законы распределения, располагаемые в порядке возрастания среднего и фактического значений коэффициентов вариации υ: нормальный (υ_{cp} =0,25, $\upsilon_{ф}$ =0,08-0,40), Вейбулла-Гнеденко (υ_{cp} =0,44, $\upsilon_{ф}$ =0,36-0,63), логарифмически нормальный (υ_{cp} =0,68, $\upsilon_{ф}$ =0,35-0,80), Вейбулла-Гнеденко (υ_{cp} =0,71, $\upsilon_{ф}$ =0,40-0,85), экспоненциальный (υ_{cp} =0,92, $\upsilon_{ф}$ =0,60-1,30).

На практике зоны значений коэффициента вариации наработок на один случай текущего ремонта представлен в табл.2.

Таблица 2

Диапазон коэффициента вариации

Вид разрушений	Коэффициент вариации	Степень вариации
Износ трущихся пар (подшипники скольжения, гильзы цилиндров, фрикционные пары)	0,1-0,3	малая
Усталостный излом при изгибе и кручении, износ подшипников скольжения, поверхностное усталостное выкрашивание, комплексная коррозия (сочетание износа, усталости и коррозии)	0,3-0,7	средняя
Разрушение по причинам ослабления крепёжных соединений, отказы систем питания по причинам засорения топливных жиклёров и магистраль. Отказы элементов электрооборудования по причинам ослабления и коррозии токопроводящих контактов	0,7-0,9	большая

Нормальный закон распределения характеризуется дифференциальной *f(x)* (функцией плотностей вероятностей) и интегральной *F(x)* (функцией распределения) функциями. Отличительная особенность дифференциальной функции распределения – симметричное рассеивание частных значений показателей надёжности относительно среднего значения.

Дифференциальную функцию описывают уравнением

$$f(xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \ell^{-\frac{(xi - M)^2}{2\sigma^2}}; \tag{1.13}$$

$$R(xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \ell^{-\frac{(xi - M)^2}{2\sigma^2}} dx; \tag{1.14}$$

где σ – среднеквадратическое отклонение; ℓ – основание натурального логарифма (ℓ = 2,718); *xi* – случайная величина; *liсер* – среднее значение случайной величины в i-ом интервале.

Нормальный закон распределения формируется тогда, когда на протекание исследуемого процесса и его результат влияет сравнительно большое число независимых (или слабозависимых) факторов, каждое из которых в отдельности оказывает лишь незначительное действие по сравнению с суммарным влиянием всех остальных.

Закон распределения Вейбулла-Гнеденко проявляется в модели так называемого "слабого звена". Если система состоит из группы независимых элементов, отказ каждого из которых приводит к отказу всей системы, то в такой модели рассматривается распределение времени (или пробега) достижения предельного состояния системы как распределение соответствующих значений *xi* отдельных элементов: $X_c = min(x_1;\ x_2;\ldots;\ x_n)$. Функция распределения этой величины может быть выражена следующей зависимостью:

$$f(xi) = \frac{b}{a}\left(\frac{xi}{a}\right)^{b-1} \ell^{\left(-\frac{xi}{a}\right)^{b}}, \tag{1.15}$$

где a и b – параметры распределения Вейбулла.

Параметр b определяют по сводной таблице (см. приложение 1) в зависимости от коэффициента вариации v. По этой же таблице определяют значение коэффициента $C_в$, по которому рассчитывается значение параметра a.

$$a = \frac{\sigma}{Cв}.$$

Логарифмически нормальный закон распределения. Если на протекание исследуемого процесса и его результат влияет сравнительно большое число случайных и взаимозависимых факторов, интенсивность действия которых зависит от достигнутого случайной величиной состояния, то возникают условия для логарифмически нормального закона. Данный закон часто сравнивают с "моделью пропорционального эффекта", которая рассматривает некоторую случайную величину, имеющую начальное состояние x_0 и конечное предельное состояние x_n.

Плотность вероятности для логарифмически нормального закона распределения выглядит следующим образом:

$$f(xi) = \frac{1}{xi\sigma\sqrt{2\pi}} \ell^{\left[-\frac{(\ell n xi - M)^2}{2\sigma^2}\right]}. \tag{1.16}$$

При *экспоненциальном законе распределения* вероятность безотказной работы не зависит от того, сколько проработало изделие с начала эксплуатации, а определяется конкретной продолжительностью рассматриваемого периода или пробега Δx, называемого временем исполнения задания. Таким образом, эта модель не учитывает постепенного изменения параметров технического состояния, например, в результате изнашивания, старения и других причин, а рассматривает так называемые нестареющие элементы и отказы. Экспоненциальный закон распределения чаще всего используется при описании внезапных отказов, продолжительности ремонта и в ряд других случаев:

$$f(xi) = \lambda \ell^{-\lambda xi}; \tag{1.17}$$

$$R(xi) = \ell^{-\lambda xi}, \tag{1.18}$$

где λ – параметр потока отказов (для этого закона $\lambda = \frac{1}{M}$, $M = \sigma$, $v = 1$).

13. Проверить совпадение опытного и теоретического законов распределения случайной величины по критерию согласия. В процессе оценки совпадения определяют степень совпадения или расхождения опытной вероятности и дифференциальной функции или же накопленной опытной вероятности и интегральной функции в интервалах статистического ряда. Для определения совпадения или расхождения выбирают различные критерии: суммы квадратов отклонения дифференциальной функции от опытной вероятности, наибольшее или наименьшее отклонение кривой накопленных вероятностей от интегральной кривой теоретического закона распределения и т.д.

При обработке статистических данных по показателям надёжности автомобильного транспорта наиболее часто применяется критерий согласия Пирсона χ^2, определяемый по уравнению

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{ny} \frac{\left(mi - mti\right)^2}{mti}, \tag{1.19}$$

где ny – число интервалов укрупнённого статистического ряда; mi - опытная частота в i-ом интервале статистического ряда; mt_i – теоретическая частота i-ом интервале статистического ряда.

Теоретическая частота

$$mti = N\left[F(ti) - F(ti-1)\right], \tag{1.20}$$

где N – число точек информации; $F(ti)$ и $F(ti\text{-}1)$ – интегральные функции i-го и (i-1)-го интервалов статистического ряда.

Для определения интегральной функции $F(ti)$ применяют уравнения:

при нормальном законе распределения

$$F(x) = F_0\left(\frac{x_{ki} - M}{\sigma}\right); \tag{1.21}$$

где xkt – значение конца i–го интервала.

При этом используют уравнение

$$F_0(x) = 1 - F_0(+x).$$

Значения функции $F(ti)$ приведены в соответствующих таблицах.

при законе распределения Вейбулла-Гнеденко

$$F(x) = F(\frac{x_{kt}}{a}), \tag{1.22}$$

где a – параметр распределения Вейбулла-Гнеденко.

Данную функцию также определяют по соответствующим таблицам.

Для определения χ^2 строят укрупнённый статистический ряд, соблюдая условие: n_y>4, mi≥5. При этом допускается объединение соседних рядов, в которых mi<5. По сводной таблице для α=0,05 и числу степеней свободы r= ny-1-2 (где ny – число укрупнённых интервалов) находим табличное значение $\chi^{`2}_{0,05;\ \mathrm{r}}$. Если $\chi^{`2}_{0,05;\ \mathrm{r}} > \chi^2$, полученного по формуле (1.19) гипотеза о принятом распределении случайной величины подтверждается.

Проверить правдоподобность принятой гипотезы о принадлежности экспериментальных данных к тому или иному закону распределения можно с помощью критерия Романовского, который определяется по формуле

$$K_{ром} = \frac{\chi^2 - \tau}{\sqrt{2\tau}}, \tag{1.21}$$

где τ – число степеней свободы.

$$\tau = N\text{-}Z\text{-}1,$$

где – Z число параметров теоретического закона; для нормального закона Z =2.

Если подсчитанный по формуле (1.21) критерий Романовского меньше трёх, то гипотеза оправдывается; если $K_{ром}$≥3, то гипотеза о принятом законе отвергается. В последнем случае необходимо принять другой закон распределения и снова провести статистическую обработку данных.

Пример.

По результатам обработки статистических данных ТР автомобиля были получены величины наработки элемента автомобиля до замены. Произвести точечную и вероятностную оценки наработки до замены, определить закон распределения случайной величины и найти вероятность отказа F_i и безотказной работы R_i элемента в процессе эксплуатации.

Величины наработки элемента до замены li, тыс. км представлены ниже. (см. приложение 2)

25	41	48	56	129	85
112	66	29	89	118	62
69	59	91	74	31	79
88	75	11	114	45	98
50	107	81	70	72	18
72	36	48	65	5	84

Точечная оценка наработки до отказа.

Точечная оценка позволяет предварительно судить о качестве изделия. Чем ниже средний ресурс и выше вариация, тем ниже качество изготовления изделия или ремонта изделия.

1. Случайные величины располагаем в порядке возрастания.

5; 11; 18; 25; 29; 31; 36; 41; 45; 48; 48; 50; 56; 59; 62; 65; 66; 69; 70; 72; 72; 74; 75; 79; 81; 84; 85; 88; 89; 91; 98; 107; 112; 114; 118; 129;

2. Определяем размах случайной величины R:

$R = x_{\max} - x_{\min} = 129 - 5 = 124$ тыс. км.

3. Определяем среднее значение наработки до отказа:

$$\bar{x}_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} = \frac{2455}{36} = 68{,}19 \text{ тыс. км.}$$

4. Определяем среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - x_{cp})^2}{n-1}} = 28{,}79$$

5. Определяем коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}_{cp}} = \frac{28{,}79}{68{,}19} = 0{,}422 .$$

Коэффициент вариации служит для предварительного определения закона распределения случайной величины. В нашем случае нормальный закон распределения.

Вероятностная оценка случайной величины.

1. Размах случайных величин разбиваем на 7 равных по величине интервалов (2 столбец табл.3).
2. Производим группировку, т.е. определяем число случайных величин в 1-ом, 2-ом и последующих интервалах. Количество случайных величин попавших в определенный интервал называется частотой (3 столбец табл.3).

Таблица 3

Номер интер-вала	Интервал Δl, тыс.км	Середина интервала l_{cepj}, тыс.км	Часто-та, m_i, шт.	Частость, $\omega i \to pi$	Дифференци-альная функ-ция распреде-ления $f(x)$	Веро-ятность Pi^*	Оценка накоплен-ных вероятностей	
							отказа F_i	безотказ-ности R_i
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0-20	10	2	0,0556	0,0018	0,0367	0,0367	0,9633
2	20-40	30	4	0,1111	0,0058	0,1181	0,1547	0,8453
3	40-60	50	8	0,2222	0,0115	0,2330	0,3877	0,6123
4	60-80	70	10	0,2778	0,0139	0,2818	0,6696	0,3304
5	80-100	90	7	0,1944	0,0103	0,2090	0,8786	0,1214
6	100-120	110	4	0,1111	0,0047	0,0950	0,9735	0,0265
7	120-140	130	1	0,0278	0,0013	0,0265	1,0000	0
ВСЕ-ГО:	-	-	36		0,0494	1,0000	-	-

3. Определяем частость: $p_i = \frac{m_i}{\sum m_i}$. Результаты заносим в 5 столбец табл.3. Частость является имперической величиной и служит для оценки вероятности.
4. Определяем среднее значение наработки до отказа:

$\bar{x}_{cp} = \sum_{i=1}^{n} p_i x_{cepi} = 77{,}778$ тыс.км.

5. Определяем среднеквадратическое отклонение:

$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_{cepi} - x_{cp})^2 p_i} = 28{,}588$ тыс.км

6. Определяем коэффициент вариации:

$\nu = \frac{\sigma}{\bar{x}_{cp}} = \frac{28{,}588}{77{,}778} = 0{,}368$.

7. Находим значения дифференциальной функции распределения. С учётом того, что значение коэффициента вариации υ<0,4, для заданного массива данных предпочтителен нормальный закон распределения, т.е.

$$f(x_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_{cep} - \bar{x}_{cp})^2}{2\sigma^2}}.$$

Найденные значения заносим в 6 столбец табл.3. В случае если коэффициент вариации $\upsilon_ф$ =0,40-0,85 распределение случайных величин подчиняется закону распределения Вейбулла-Гнеденко, если $\upsilon_ф$ =0,60-1,30 - экспоненциальному.

8. Определяем вероятность отказа, т.е. отношение числа случаев благоприятствующих возникновению событий к общему числу случаев:

$P_i^* = \frac{f(x_i)}{\sum f(x_i)}$. Найденные значения заносим в 7 столбец табл.3.

9. Определяем вероятность отказов F_i, которая может быть получена суммированием интервальных вероятностей за наработку x_i:

$F(x_i) = P_1^* + P_2^* + ... + P_i^*$. Полученные значения заносим в 8 столбец табл.3.

10. Определяем вероятность безотказности работы R_i:

$R_i = 1 - F_i$. Полученные значения заносим в 9 столбец табл.3.

По данным таблицы строим графики: $m_i(x_i)$; $p_i(x_i)$; $P_i^*(x_i)$; $F_i(x_i)$; $R_i(x_i)$ (см. стр.).

10. Составить отчёт, используя титульный лист (см. приложение 6).

Контрольные вопросы:

1. *Какие законы распределения случайных величин существуют?*
2. *Каким образом определяется коэффициент вариации?*
3. *Что такое частота случайных величин?*

4. *Что такое частость случайных величин?*
5. *Каким образом определяется нормальный закон распределения случайной величины?*
6. *Чем отличается дифференциальное и интегральное распределение случайной величины?*
7. *Если на протекание исследуемого процесса и его результат влияет сравнительно большое число случайных и взаимозависимых факторов, интенсивность действия которых зависит от достигнутого случайной величиной состояния, условия для какого закона распределения возникают?*
8. *Какой закон распределения чаще всего используется при описании внезапных отказов, продолжительности ремонта?*
9. *Каким образом определяется размах случайной величины?*
10. *Какой критерий согласия используют при проверке совпадение опытного и теоретического законов распределения случайной величины по критерию согласия?*

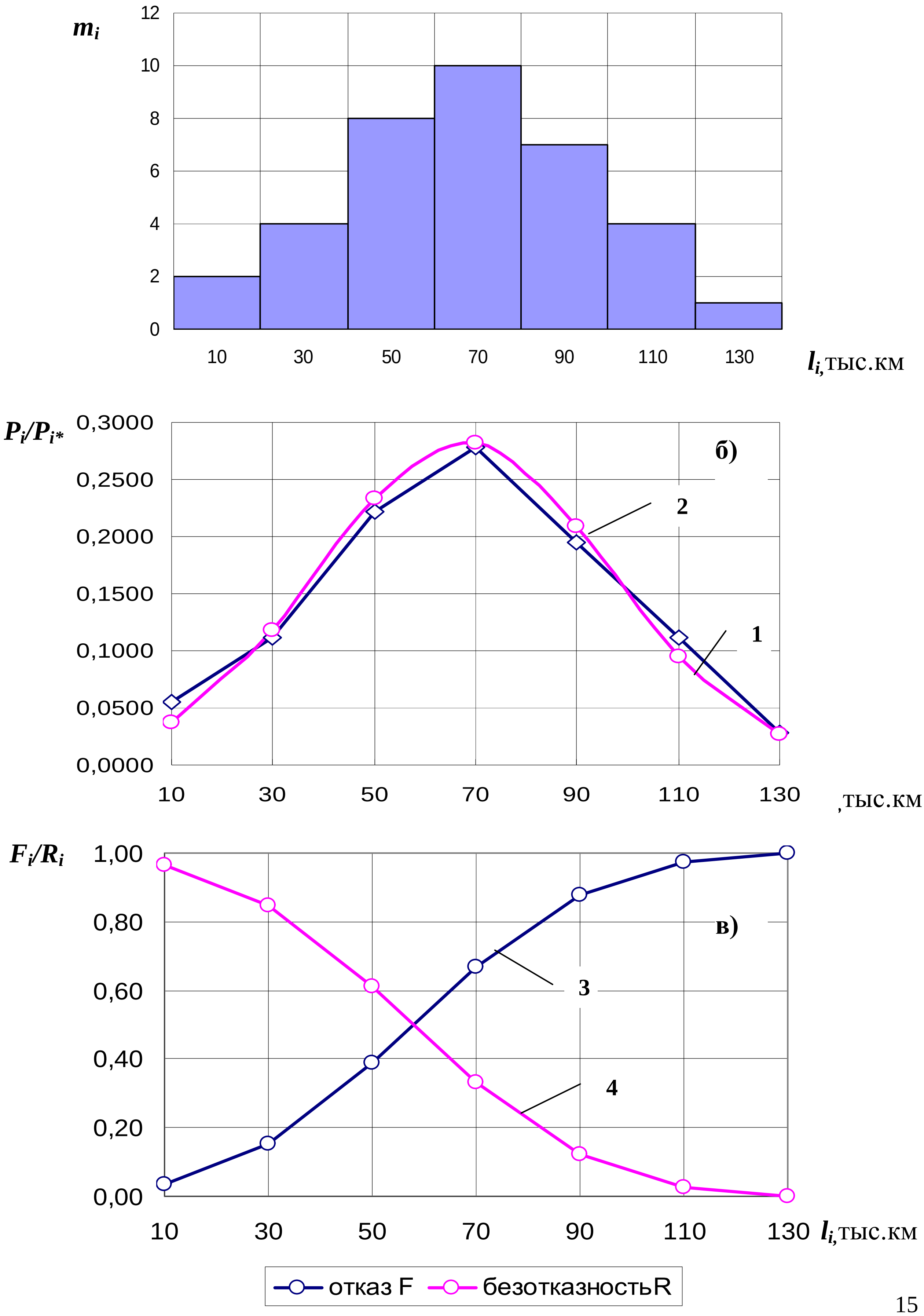

Рис.3. а) гистограмма распределения величин наработки на замену;
б) дифференциальная фактическая P_i 1 и расчётная P_{i*} 2 вероятность безотказ-

Лабораторная работа №2

Лабораторная работа №2
Изучение закономерностей изменения параметров технического состояния автомобиля по его наработке

Введение

При обработке результатов наблюдений довольно часто получается так, что получен ряд значений переменных x и y, однако характер функциональной зависимости между ними неизвестен. Требуется по данным наблюдений найти аналитическое выражение зависимости между x и y. Такие формулы принято называть эмпирическими. При определении эмпирической зависимости не ставят перед собой задачу разгадать истинный характер зависимости между переменными x и y. Основная задача заключается в том, чтобы предоставить результаты опыта наиболее простой формулой, которая, во-первых, давала бы возможность нахождение промежуточных значений функции, т.е. интерполирование и, во-вторых, позволила применить методы математического анализа.

Пусть зависимость между переменными величинами x и y выражается в виде таблицы:

x	x_1	x_2	…	x_n
y	y_1	y_2	…	y_n

полученной опытным путём, например, в результате эксперимента или статистической обработки материала.

Требуется найти эмпирическую формулу $y = \varphi(x)$.

При отыскании эмпирической формулы приходится решать две задачи:

1) выяснение общего вида этой формулы;

2) определение её параметров.

Например, износ ведомого диска сцепления или зазор в подшипниковом узле коленчатого кала двигателя.

Выбор общего вида эмпирической формулы

В этом случае, характер функциональной зависимости между данными величинами неизвестен, то вид эмпирической формулы является произвольным. При этом предпочтение отдаётся более простым формулам, обладающим хорошей точностью.

В прямоугольной системе координат строим экспериментальные точки с координатами (x_1, y_1), (x_2, y_2), … (x_n, y_n). Построение лучше производить на миллиметровой бумаге. Затем проводим плавную кривую φ, как можно ближе примыкающую к полученным точкам (рис.4).

Сравнивая полученную кривую с графиками известных функций, делаем выбор нужной формулы.

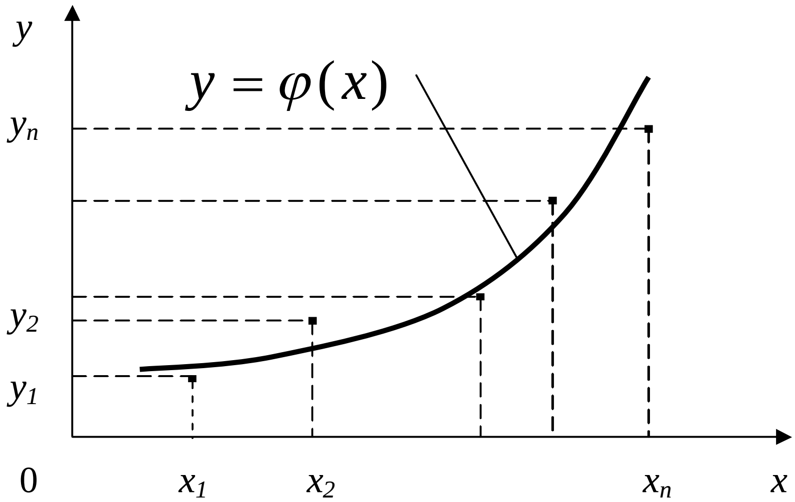

Рис.4. Предположительный вид экспериментальной кривой

Существуют и аналитические методы подбора аналитических формул.

Определение параметров эмпирической формулы методом наименьших квадратов

После того, как выбран вид эмпирической формулы, возникает задача отыскания значений параметров, входящих в эту формулу. Пусть выбрана эмпирическая формула:

, (2.1)

где φ - известная функция; $a_1, a_2, ..., a_n$ - параметры, подлежащие определению.

Существуют различные методы определения этих параметров. Наибольшее применение нашёл метод наименьших квадратов, теоретическое обоснование которого даётся в теории вероятностей. Сущность данного метода сводится к следующему.

Рассмотрим разности между значениями функции и экспериментальными значениями y_i в соответствующих точках:

$$\Delta_i = \varphi(x_i, a_1, a_2, ..., a_n) - y_i \ . \qquad (2.2)$$

Назовём их отклонениями. Геометрически отклонения представляют собой расстояния по вертикали точек (x_i, y_i), построенных по опытным данным, от графика эмпирической функции (1), взятыми со знаками "+" или "-" (рис.5).

Эмпирическая функция подбирается таким образом, чтобы её график как можно ближе подходил к опытным точкам, то есть отклонения по абсолютной величине были по возможности малыми. Поэтому параметры эмпирической зависимости (1) выбирают так, чтобы сумма квадратов отклонений была наименьшей, то есть функция

$$F(a_1, a_2, \ldots a_i) = \sum_{i=1}^{n} \left[\varphi(x_i, a_1, a_2, \ldots a_n) - y_i\right]^2 \tag{2.3}$$

имела минимум.

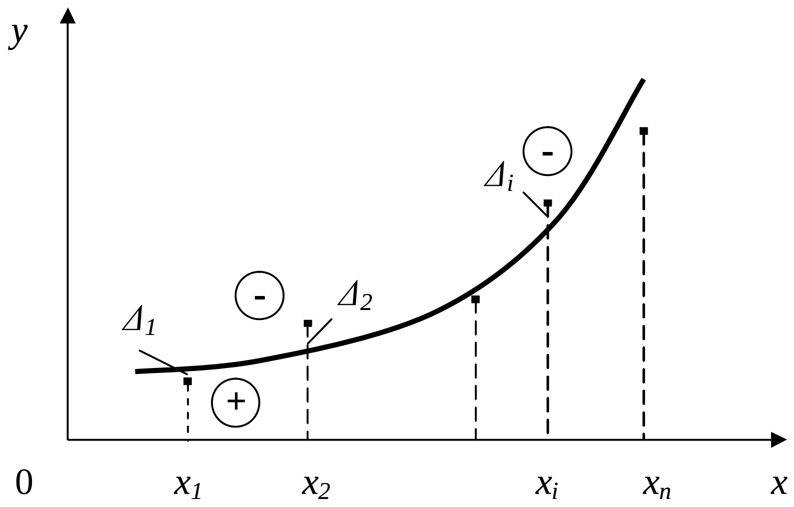

Рис.5. Подбор эмпирической кривой

Используя необходимое условие существования экстремума функции многих переменных, получаем систему уравнений для определения параметров $a_1, a_2, \ldots, a_n$, то есть

$$\frac{\partial F}{\partial a_1} = 0, \qquad \frac{\partial F}{\partial a_2} = 0, \quad \ldots \quad \frac{\partial F}{\partial a_{n1}} = 0. \tag{2.4}$$

Если система уравнений (4) имеет единственное решение, то оно является искомым. Найденные значения параметров будут наилучшими, если сумма квадратов отклонений, а, следовательно, и сами отклонения Δ_i будут меньше, чем при других значениях параметров.

Нахождение параметров линейной функции

Будем искать по результатам экспериментальных данных зависимость y от x в виде $y = ax + b$

Строим вспомогательную функцию

$$F(a,b)=\sum_{i=1}^{n}(y_i-ax_i-b)^2\,. \qquad (2.6)$$

Для определения параметров a и b получаем систему уравнений

$$\begin{cases}\dfrac{\partial F}{\partial a}=0;\\[2mm] \dfrac{\partial F}{\partial b}=0;\end{cases} \qquad \text{или} \qquad \begin{cases}\sum\limits_{i=1}^{n}2(y_i-ax_i-b)(-x_i)=0;\\ \sum\limits_{i=1}^{n}2(y_i-ax_i-b)(-1)=0.\end{cases} \qquad (2.7)$$

Систему (2) преобразуем к виду:

$$\begin{cases}-\sum\limits_{i=1}^{n}y_ix_i+a\sum\limits_{i=1}^{n}x_i+b\sum\limits_{i=1}^{n}x_i=0;\\ -\sum\limits_{i=1}^{n}y_i+a\sum\limits_{i=1}^{n}x_i+bn=0;\end{cases}$$

$$\begin{cases}\sum\limits_{i=1}^{n}y_ix_i=a\sum\limits_{i=1}^{n}x_i+b\sum\limits_{i=1}^{n}x_i\,;\\ \sum\limits_{i=1}^{n}y_i=a\sum\limits_{i=1}^{n}x_i+bn.\end{cases} \qquad (2.8)$$

Система (3) называется нормальной системой уравнений. При решении системы (3) для удобства расчётов используют следующую таблицу.

№	x	y	x_i^2	$x_i y_i$	y_i^{ϕ}	Δ_i	Δ_i^2
1.	x_1	y_1	x_1^2	$x_1 y_1$	y_1^{ϕ}	Δ_1	Δ_1^2
2.	x_2	y_2	x_2^2	$x_2 y_2$	y_2^{ϕ}	Δ_2	Δ_2^2
…	…	…	…	…	…	…	…
n	x_n	y_n	x_n^2	$x_n y_n$	y_n^{ϕ}	Δ_n	Δ_n^2
	$\sum_{i=1}^{n}x_i$	$\sum_{i=1}^{n}y_i$	$\sum_{i=1}^{n}x_i^2$	$\sum_{i=1}^{n}x_i y_i$			$\sum_{i=1}^{n}\Delta_i^2$

Примечание:

1. Последние три столбца вычисляются после нахождения a и b из системы (3).
2. Качество приближений оценивается по формуле средней квадратичной ошибки

$$\delta=\sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{n}\Delta_i^2}{n-1}}$$

Например, определить коэффициенты в формуле $y = ax + b$, которая выражает длину металлического стержня y при температуре x по следующим данным

x	20°	48°	50°	60°
y	1000,22	1000,65	1000,90	1001,05

Нанесём на график в системе (x, y) точки, указанные в таблице (рис.6).
По графику видно, что искомая зависимость является линейной.
Ищем коэффициенты a и b.

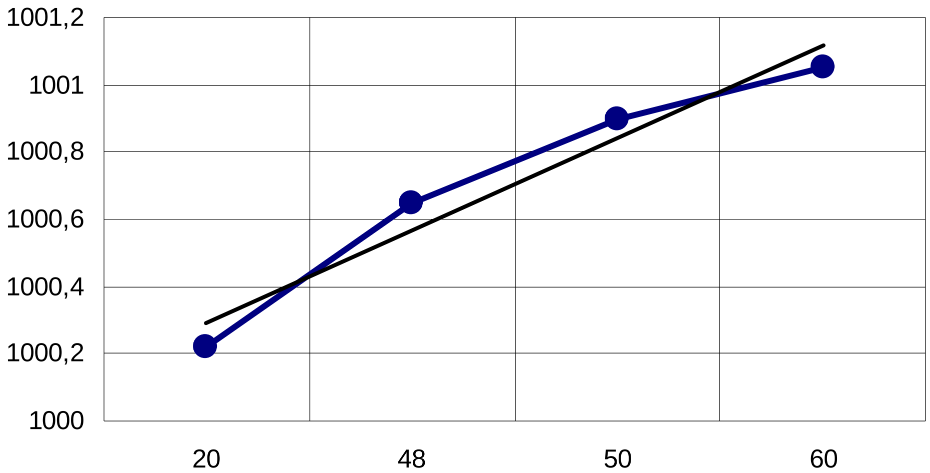

Рис.6. Зависимость удлинения стержня от температуры

Для этого составляем нормальную систему уравнений

$$\begin{cases} \sum\limits_{i=1}^{n} y_i x_i = a\sum\limits_{i=1}^{n} x_i + b\sum\limits_{i=1}^{n} x_i \ ; \\ \sum\limits_{i=1}^{n} y_i = a\sum\limits_{i=1}^{n} x_i + 4b \ . \end{cases} \qquad (2.9)$$

Результаты вычислений заносим в таблицу.

№ п/п	x_i	y_i	y_i^2	$x_i\, y_i$	y_i^{ϕ}	Δ_i	Δ_i^2
1.	20	1000,22	400	20004,4	1000,203	-0,017	0,0002899
2.	48	1000,65	2304	48031,2	1000,777	0,100	0,016129
3.	50	1000,90	2500	50045,0	1000,818	-0,092	0,008464
4.	60	1001,05	3600	60063,0	1001,023	0,027	0,000729
$\sum\limits_{i=1}^{4}$	178	4002,82	8804	178143,6			0,025611

Подставим найденные значения в систему уравнений, получим

$$\begin{cases} 8804a + 178b = 178143{,}6 \ ; \end{cases}$$

$$178a + 4b = 4002{,}82\,. \qquad (2.10)$$

Отсюда $a = 0.0205$, а $b = 999{,}73$.

Следовательно, искомая формула $y = 999{,}793 + 0{,}0205x$. (2.11)

Определяем фактическое удлинение стержня по зависимости (6), полученные результаты заносим в предыдущую таблицу.

Средняя квадратичная погрешность

$$\delta = \sqrt{\frac{0{,}025611}{3}} = 0{,}094\,.$$

Нахождение параметров параболической зависимости

Пусть результаты опытов (x_i, y_i)= (*1, 2, 3, …n*);

Строим вспомогательную функцию

$$F[a,b,c] = \sum_{i=1}^{n} (y_i - ax_i^2 - bx_i - c)^2 \qquad (2.12)$$

Система для определения *a, b, c* имеет вид

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} 2(y_i - ax_i^2 - bx_i - c)(-x_i^2) = 0; \\ \sum_{i=1}^{n} 2(y_i - ax_i^2 - bx_i - c)(-x_i) = 0; \\ \sum_{i=1}^{n} 2(y_i - ax_i^2 - bx_i - c)(-1) = 0; \end{cases} \qquad (2.13)$$

или

$$\begin{cases} a\sum_{i=1}^{n} x_i^4 + b\sum_{i=1}^{n} x_i^3 + c\sum_{i=1}^{n} x_i^2 = \sum_{i=1}^{n} x_i^2 y_i\ ; \\ a\sum_{i=1}^{n} x_i^3 + b\sum_{i=1}^{n} x_i^2 + c\sum_{i=1}^{n} x_i = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i\ ; \\ a\sum_{i=1}^{n} x_i^2 + b\sum_{i=1}^{n} x_i + cn = \sum_{i=1}^{n} y_i\ . \end{cases} \qquad (2.14)$$

При решении нормальной системы уравнений (2.14) вручную результаты для удобства заносятся в табл.5.

Таблица 5

№ опыта	x_i	y_i	x_i^2	x_i^3	x_i^4	$x_i y_i$	$x_i^2 y_i$	$y_i^ф$	Δ_i	Δ_i^2
1.	x_1	y_1	x_1^2	x_1^3	x_1^4	$x_1 y_1$	$\sum_{i=1}^{n} x_1^2 y_i$	$y_1^ф$	Δ_1	Δ_1^2
2.	x_2	y_2	x_2^2	x_2^3	x_2^4	$x_2 y_2$	$\sum_{i=1}^{n} x_2^2 y_i$	$y_2^ф$	Δ_2	Δ_2^2
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…

n	x_n	y_n	x_n^2	x_n^3	x_n^4	$x_n y_n$	$\sum_{i=1}^{n} x_n^2 y_i$	y_n^{ϕ}	Δ_n	Δ_n^2

Пример. Аккумуляторная батарея на семь свинцовых элементов разряжается на некотором сопротивлении. Измеряется время от начала разряда t и напряжение E на зажимах. Получена следующая таблица.

t	10,0	12,8	20,0	26,0	32,0	38,0
E	15,2	14,5	13,5	13,5	12,8	12,5

Найти зависимость $E = at^2 + bt + c.$ Ищем a, b и c. Для этого составляем нормальную систему уравнений.

$$\begin{cases} a\sum_{i=1}^{6} t_i^4 + b\sum_{i=1}^{6} t_i^3 + c\sum_{i=1}^{6} t_i^2 = \sum_{i=1}^{n} t_i^2 E_i \ ; \\ a\sum_{i=1}^{6} t_i^3 + b\sum_{i=1}^{6} t_i^2 + c\sum_{i=1}^{6} t_i = \sum_{i=1}^{n} t_i E_i \ ; \\ a\sum_{i=1}^{6} t_i^2 + b\sum_{i=1}^{6} t_i + c6 = \sum_{i=1}^{6} t_i \ . \end{cases} \tag{2.15}$$

Результаты вычислений заносим в следующую таблицу.

№ опыта	t_i	E_i	t_i^2	t_i^3	t_i^4	$t_i E_i$	$t_i^2 E_i$	E_i^{ϕ}	Δ_i	Δ_i^2
1.	10,0	15,2	100,00	1000,00	10000,0	152,0	1520,0	15,19	-0,01	0,0001
2.	12,8	14,5	163,85	2097,15	26843,5	185,6	2377,7	15,13	0,63	0,3969
3.	20,0	13,5	400,00	3000,00	160000,00	270,0	5400,0	14,85	1,85	1,8225
4.	26,0	13,5	676,00	17576,00	456976,00	351,0	9126,0	14,48	1,13	1,2789
5.	32,0	12,8	1204,00	38528,00	1232896,0	409,6	13107,2	13,66	0,68	0,4224
6.	38,0	12,5	1444,00	54872,00	2085136,0	475,0	18050,0	13,36	0,86	0,7396
Итого:	138,8	82,0	3987,84	122073,15	3971851,5	1843,2	49530.9	-	-	4,6984

Подставим найденные значения в систему уравнений, получим

$$\begin{cases} 3971900a + 122073\,b + 3987{,}8c = 49581; \\ 122073a + 3987{,}8b + 138{,}8 = 1843{,}2; \\ 398{,}8a + 138{,}8b + 6c = 82{,}0. \end{cases}$$

Отсюда a = -0,00175; в = - 0,01889; c = 15,17365.

Следовательно, искомая формула имеет вид

$$E = -0{,}001756t^2 - 0.01889t + 15.17365$$

Средняя квадратичная погрешность

$$\delta = \sqrt{\frac{4.6984}{6-1}} = 0.096\,.$$

Нанесём на графике в системе (t, E) точки, полученные в результате опыта, и точки на теоретической параболе (рис.6).

Составить отчёт, используя титульный лист (см. приложение 6).

Контрольные вопросы:

1. *Каким образом определяется средняя квадратическая погрешность?*
2. *В чём смысл метода наименьших квадратов?*
3. *Последовательность определения параметров кривых изнашивания?*

Приложение 1

Параметры и коэффициенты распределения Вейбулла

υ	***b***	***Кв***	***Св***	***υ***	***b***	***Кв***	***Св***	***υ***	***b***	***Кв***	***Св***
1,26	0,80	1,13	1,43	0,55	1,90	0,89	0,49	0,36	3,00	0,89	0,33
1,11	0,90	1,07	1,20	0,52	2,00	0,89	0,46	0,35	3,10	0,89	0,32
1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	2,10	0,89	0,44	0,34	3,20	0,90	0,31
0,91	1,10	0,97	0,88	0,48	2,20	0,89	0,43	0,33	3,30	0,90	0,30
0,84	1,20	0,94	0,79	0,46	2,30	0,89	0,41	0,33	3,40	0,90	0,29
0,78	1,30	0,92	0,72	0,44	2,40	0,89	0,39	0,32	3,50	0,90	0,29
0,72	1,40	0,91	0,66	0,43	2,50	0,89	0,38	0,31	3,60	0,90	0,28
0,68	1,50	0,90	0,61	0,41	2,60	0,89	0,37	0,30	3,70	0,90	0,27
0,64	1,60	0,90	0,57	0,40	2,70	0,89	0,35	0,29	3,80	0,90	0,27
0,61	1,70	0,89	0,54	0,39	2,80	0,89	0,34	0,29	3,90	0,91	0,26
0,58	1,80	0,89	0,51	0,38	2,90	0,89	0,34	0,28	4,00	0,91	0,25

υ – коэффициент вариации

Приложение 2

Точечная и вероятностная оценка
для нормального распределения случайных величин

Вариант №1

Наработка до отказа L_0, тыс.км

36,6	51,1	28,8	49,8	37,3	14,5	38,2	62,8	32,5	26,9
5,3	32,5	47,3	31,3	59,4	40,8	27,7	35,4	6,2	38,4
44,5	30,7	52,0	11,1	23,4	35,7	55,5	25,3	49,7	69,6
20,1	44,9	22,7	66,5	38,0	45,5	19,2	58,9	39,1	18,7

Вариант №2

Наработка до отказа L_0, тыс.км

1,8	14,7	27,9	9,0	16,6	13,7	16,2
6,4	20,4	18,8	19,3	5,2	18,9	10,3
15,4	33,4	3,6	11,4	15,9	28,1	21,6
13,2	22,5	19,1	20,9	8,3	26,7	17,3
24,7	14,0	27,4	22,2	19,0	12,5	15,6

Вариант №3

Наработка до отказа L_0, тыс.км

55,1	49,3	23,6	47,7	12,5	40,9	26,5
42,8	39,1	33,3	52,5	38,6	38,9	19,4
35,4	46,8	52,7	36,6	7,0	37,6	34,2
64,5	29,2	48,5	35,8	62,8	32,0	24,8
44,6	18,3	34,7	59,5	41,1	27,9	37,8

Вариант №4

Наработка до отказа L_0, тыс.км

44,5	83,3	105,4	95,3	48,2	69,9	41,1
23.3	62,8	35.6	74,7	59,8	118,7	82,4
109.9	19.4	70,7	88,2	69,1	61,0	46,5
98,1	72,8	51,3	77,0	10.6	68,5	60,9
53,7	79,9	94,6	112,0	76,7	89,0	28.0

Вариант №5

Наработка до отказа L_0, тыс.км

15,2	52,3	23,1	55,0	30,8	25,6	22,3	38,2	12,6
49,7	36,6	21,9	35,7	18,3	37,2	44,1	27,8	46,8
51,5	29,4	38,5	59,2	37,1	5,7	30,9	38,7	24,6
36,4	8,2	42,2	17,1	38,1	47,8	25,0	58,7	44,4
34,8	35,9	32,2	48,5	29,1	41,1	59,1	18,4	31,1

Вариант №6

Наработка до отказа L_0, тыс.км

3,1	13,0	7,5	15,7	31,0	11,7	26,4	6,5	14,3
16,2	23,9	8,3	25,2	17,3	10,1	18,8	12,8	27,7
24,8	29,5	19,1	21,6	24,0	21,3	33,4	24,9	2,7
14,7	23,0	4,4	22,4	23,8	12,4	16,8	19,2	17,5
9,0	18,3	19,7	29,8	18,1	28,6	12,8	8,9	15,9

Вариант №7

Наработка до отказа L_0, тыс.км

19,1	41,1	22,4	37,1	52,3	44,3	62,3	33,4	59,1	45,3
39,0	21,5	35,6	57,0	14,5	38,7	29,9	47,7	27,3	18,4
37,6	47,2	6,3	34,5	48,4	59,9	31,2	12,7	49,8	35,7
28,2	51,4	41,8	32,6	25,6	46,2	67,0	39,8	27,6	58,2

Вариант №8

Наработка до отказа L_0, тыс.км

79,31	110,7	15,6	149,5	82,3	62,4	103,1	37,8	87,6	59,7
118,5	54,1	89,1	100,2	35,4	90,5	48,2	92,4	75,9	99,9
137,6	90,8	68,9	93,7	117,2	56,0	87,3	105,4	82,3	109,8
110,3	24,5	52,4	41,8	81,5	122,2	88,8	74,7	49,5	89,2

Вариант №9

Наработка до отказа L_0, тыс.км

40,5	48,4	51,6	34,2	68,9	36,1	47,6
50,8	65,0	11,1	42,3	55,8	25,8	57,2
31,5	3,3	76,9	38,3	16,8	64,5	36,9
63,2	41,2	33,6	48,8	44,1	59,2	45,7
21,3	73,0	49,5	24,4	57,9	39,9	28,9

Вариант №10

Наработка до отказа L_0, тыс.км

20,9	18,9	27,2	16,5	23,1	12,4	22,7	21,6	15,8	14,6
15,1	10,4	26,8	4,5	33,2	17,1	28,9	9,3	24,1	29,9
32,0	24,8	26,0	21,2	19,4	11,2	34,8	18,3	11,8	22,7
5,6	28,5	7,2	22,0	15,3	22,4	24,6	13,7	18,9	24,2

Примечание 3

Точечная и вероятностная оценка для закона распределения случайных величин Вейбулла-Гнеденко

Вариант №1

Наработка до отказа L_0, тыс.км

65,2	22,5	44,5	25,0	37,3	42,8	12,4
29,1	32,0	54,3	10,8	5,4	27,8	17,3
67,1	27,6	41,0	7,2	28,8	12,9	33,2
51,3	18,1	43,6	74,5	27,2	59,8	39,1
49,7	18,0	26,6	8,4	28,7	15,0	63,4

Вариант №2

Наработка до отказа L_0, тыс.км

32,1	10,4	57,9	13,7	30,2	13,5	6,7	26,8	38,3	29,3
28,9	3,5	24,0	19,9	77,4	23,2	15,0	54,3	18,9	35,1
62,1	27,3	11,5	35,7	22,6	17,8	44,5	23,5	12,4	8,9

Вариант №3

Наработка до отказа L_0, тыс.км

43,8	8,2	28,9	32,2	18,5	23,1	48,6	19,3	54,2	13,4
11,0	69,3	2,4	49,1	29,5	37,8	10,7	24,5	7,4	35,2
38,6	9,9	13,8	21,3	55,2	18,9	5,2	310	12,1	27,6
27,8	47,3	27,1	6,0	17,7	39,4	16,6	28,7	57,	15,9

Вариант №4

Наработка до отказа L_0, тыс.км

38,5	58,7	13,5	42,1	8,7	28,6	47,8
22,6	10,3	27,1	12,5	23,4	64,5	29,0
72,3	44,5	3,0	25,3	48,6	18,9	13,6

18,8	26,3	42,1	16,2	15,7	24,1	6,7
33,3	9,1	22,7	53,2	27,2	38,0	26,4

Вариант №5

Наработка до отказа L_0, тыс.км

43,6	3,7	27,6	11,4	20,8	49,5	15,0
29,8	13,9	72,4	28,7	8,2	29,3	18,9
18,5	21,0	10,5	42,0	18,2	63,5	26,6
23,2	53,8	25,4	17,4	12,6	19,3	42,8
16,2	28,6	49,1	22,3	9,4	25,4	51,7

Вариант №6

Наработка до отказа L_0, тыс.км

54,5	28,1	5,4	23,6	33,7	29,9	52,3	8,0	17,5	65,4
23,8	47,0	18,2	74,5	22,9	36,2	38,5	25,7	42,3	19,8
38,6	24,5	49,1	38,2	12,6	42,5	26,4	68,1	25,5	34,0
79,6	10,2	3,9	16,8	58,0	14,6	8,9	18,3	48,7	9,3

Вариант №7

Наработка до отказа L_0, тыс.км

20,7	65,2	19,1	54,3	16,3	51,0	15,0	62,8	27,1	9,7
17,0	44,4	21,2	17,8	32,3	7,3	24,8	19,4	40,0	25,3
5,6	13,5	61,2	26,4	59,4	29,9	13,9	58,1	19,6	38,5
23,5	58,3	12,7	8,6	11,0	42,7	74,3	25,2	8,4	28,8

Вариант №8

Наработка до отказа L_0, тыс.км

21,0	5,4	47,5	18,3	6,8	17,6	65,3	28,5	37,8	42,2
34,7	25,6	38,1	22,0	12,3	39,5	28,7	3,8	18,5	29,4
29,2	78,3	25,3	5,6	68,7	27,6	19,5	231	54,5	12,0
8,1	17,7	35,0	21,9	11,1	32,8	44,3	9,2	19,6	39,3

Вариант №9

Наработка до отказа L_0, тыс.км

24,5	3,3	21,0	76,4	24,0	38,5	54,3
12,6	23,5	33,9	8,8	37,1	13,5	35,0
27,1	32,1	19,0	25,5	27,6	65,2	22,2
35,2	57,0	23,9	9,5	24,6	79,3	27,6
18,3	34,5	17,5	56,3	72,1	5,4	31,9

Вариант №10

Наработка до отказа L_0, тыс.км

12,0	29,3	48,8	38,5	13,4	37,1	28,8	67,7	25,2
54,3	21,3	11,4	27,8	40,3	26,0	8,2	29,4	17,7
19,5	5,8	27,7	72,4	28,5	31,0	17,8	33,8	25,9

11,4	28,8	34,5	24,4	14,3	45,1	28,2	15,1	16,0
9,4	41,1	23,4	12,0	37,8	25,3	12,4	77,3	8,8

Примечание 4

Точечная и вероятностная оценка для экспоненциального закона распределения случайных величин

Вариант №1

Наработка до отказа L_0, тыс.км

44,3	9,7	17,2	3,4	32,3	18,4	59,2
19,0	39,8	9,7	22,5	12,7	7,3	5,5
37,9	11,5	67,3	5,1	15,2	47,8	21,6
8,4	45,0	6,2	18,8	72,4	8,3	17,1
51,1	6,6	26,4	32,5	10,7	8,5	34,7

Вариант №2

Наработка до отказа L_0, тыс.км

24,6	3,5	19,8	1,8	42,1	3,9	67,6
3,5	83,6	9,2	27,3	7,1	18,7	6,3
16,2	8,2	38,4	4,3	75,2	5,6	24,8
43,7	7,7	9,8	28,1	3,0	12,5	33,9
11,4	19,9	53,1	6,5	16,7	20,6	8,3

Вариант №3

Наработка до отказа L_0, тыс.км

17,4	7,6	12,8	1,4	32,4	3,0	5,1	15,3	4,0	14,5
2,2	27,8	3,6	22,3	4,6	13,3	3,5	7,9	14,1	2,7
11,2	5,3	18,9	1,7	12,5	1,7	21,4	3,9	8,0	33,5

Вариант №4

Наработка до отказа L_0, тыс.км

7,4	1,6	15,7	3,8	8,5	14,5	1,0
27,6	8,0	13,3	9,1	18,2	2,7	30,7
2,0	2,5	39,4	12,0	3,5	13,6	1,9
5,9	10,2	3,2	6,3	13,4	3,8	16,1
12,5	4,4	6,8	22,8	4,9	32,3	9,4

Вариант №5

Наработка до отказа L_0, тыс.км

40,2	19,7	100,4	22,7	62,3	12,1	93,5	13,7	24,0	128,2
25,3	66,8	15,0	47,6	16,0	28,7	10,5	48,6	18,8	5,4

35,4	80,9	3,2	135,6	10,7	39,8	49,3	9,4	69,1	4,6

Вариант №6

Наработка до отказа L_0, тыс.км

1,4	84,7	19,6	64,3	11,1	29,4	59,3
59,4	36,6	85,9	18,5	21,5	100,9	18,1
8,3	24,8	15,0	154,2	16,7	28,5	77,7
22,1	42,5	39,9	37,8	50,0	90,2	14,8
9,3	95,6	137,8	10,4	112,3	17,3	31,6

Вариант №7

Наработка до отказа L_0, тыс.км

9,2	41,8	5,1	29,5	7,4	11,4	1,6	31,0	19,0	56,4
23,2	8,7	10,3	6,0	42,9	5,8	67,9	8,2	16,5	3,1
2,6	39,4	7,8	72,3	18,7	35,6	9,1	19,2	35,8	17,7

Вариант №8

Наработка до отказа L_0, тыс.км

54,8	3,6	22,5	17,1	39,5	5,6	27,4	3,6	62,3	8,7
7,5	45,8	1,3	79,6	6,4	26,0	7,2	10,8	7,0	25,4
29,9	11,1	37,2	4,0	27,1	5,3	52,1	2,7	19,3	9,1

Вариант №9

Наработка до отказа L_0, тыс.км

11,5	6,2	3,0	32,1	8,3	25,6	14,5	7,3	18,6	63,5
29,4	17,8	6,0	15,4	2,8	42,9	7,6	27,8	8,2	9,0
5,5	47,5	3,2	28,2	19,0	9,4	18,1	3,9	26,1	7,2

Вариант №10

Наработка до отказа L_0, тыс.км

65,4	7,3	25,6	3,7	38,8	7,2	25,0	1,6	19,0	27,8
8,8	52,3	18,2	23,3	6,9	47,1	16,5	9,3	77,2	3,5
25,0	6,7	41,6	2,4	11,8	2,5	29,4	32,5	6,4	11,9

Приложение 5

Зависимость параметра технического состояния *Y* от наработки с начала эксплуатации *l*, тыс.км

Вариант 1

Y, мм	1,0	5,0	6,0	5,3	6,0	7,4	7,8
l, тыс.км	0	16	34	45	60	78	115

Вариант 2

Y, мм	0	0,1	0,25	0,16	0,4	0,36	0,5

l, тыс.км	0	15	28	35	40	60	60

Вариант 3

Y, мм	0,1	0,25	0,46	0,6	0,42	0,7	0,63
l, тыс.км	0	17	25	40	44	50	59

Вариант 4

Y, мм	2,0	2,2	3,9	3,1	5,3	4,2	6,0
l, тыс.км	0	21	58	66	80	100	120

Вариант 5

Y, мм	0	0,4	0,65	1,2	0,95	1,8	1,22	1,9
l, тыс.км	0	14	30	32	40	48	50	65

Вариант 6

Y, мм	1,0	1,4	2,5	3,3	3,5	4,2	4,0
l, тыс.км	0	10	20	30	40	46	60

Вариант 7

Y, мм	0,1	0,5	0,52	1,5	1,0	1,3	2,2
l, тыс.км	0	15	30	4,0	45	60	68

Вариант 8

Y, мм	0,01	0,02	0,025	0,035	0,028	0,044	0,046	0,04
l, тыс.км	0	20	48	70	90	90	115	136

Вариант 9

Y, мм	0	3,0	3,0	4,6	6,2	5,2	6,5
l, тыс.км	0	15	28	28	38	44	63

Вариант 10

Y, мм	0,2	0,3	0,52	0,8	0,48	0,64	0,95	0,9
l, тыс.км	0	28	30	60	66	75	92	131

Вариант 11

Y, мм	0,01	0,018	0,024	0,033	0,027	0,035	0,046	0,048	0,055
l, тыс.км	0	26	48	48	70	88	90	115	115

Вариант 12

Y, мм	0,04	0,05	0,10	0,062	0,14	0,095	0,175	0,13	0,185	0,18
l, тыс.км	0	8	15	25	33	35	45	48	55	65

Вариант 13

Y, мм	0	0,2	1,5	3,5	2,6	3,1	5,0	3,8	5,3

l, тыс.км	0	5	10	15	20	25	30	35	40

Вариант 14

Y, мм	0,1	0,25	1,25	0,4	1,3	2,2	2,9	2,4	2,8
l, тыс.км	0	5	18	20	35	36	45	57	68

Вариант 15

Y, мм	0	0,16	0,2	0,6	0,8	0,48	1,1	0,84	1,45	1,3	1,55
l, тыс.км	0	10	30	32	60	72	82	96	112	126	130

Вариант 16

Y, мм	0	0,1	0,15	0,44	0,56	0,43	0,74	0,65	0,82	0,9	0,87
l, тыс.км	0	10	40	40	56	68	68	96	98	120	125

Вариант 17

Y, мм	0,5	1,2	0,8	1,3	2,2	3,3	1,7	2,7	3,4	3,2	4,1
l, тыс.км	0	5	7	13	18	19	28	34	34	38	43

Вариант 18

Y, мм	1	1,8	3,6	5,0	4,4	6,6	5,6	7,4	8,8	7,2	10,0
l, тыс.км	0	12	13	24	36	36	56	58	67	78	79

Вариант 19

Y, мм	0,2	0,33	0,31	0,36	0,53	0,46	0,75	0,51	0,97	0,75	0,94
l, тыс.км	0	4	8	14	14	22	24	28	33	37	43

Вариант 20

Y, мм	0	0,08	0,3	0,67	0,44	1,06	1,47	1,1	1,92	1,35	1,64
l, тыс.км	0	7	8	16	27	33	44	55	65	76	78

Приложение 6

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ФИЛИАЛ ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. СЫЗРАНИ

Кафедра "Техническая эксплуатация и ремонт транспортных средств"

О Т Ч Ё Т

по лабораторным работам по дисциплине:
"ОСНОВЫ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ"

Выполнил студент гр. № ______

________________________________ подпись Ф.И.О.

Проверил, доцент

________________________________ подпись Ф.И.О.

Сызрань 200___-г.