



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Технология машиностроения»

И. В. Царенко

**ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ,
ИЗОБРЕТАТЕЛЬСТВА И ИННОВАЦИОННОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

ПРАКТИКУМ

**по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-36 01 01
«Технология машиностроения»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2013

УДК 621.002(075.8)
ББК 30я73
Ц18

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 11.02.2013 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Металлорежущие станки и инструменты» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *М. И. Михайлов*

Царенко, И. В.

Ц18

Основы исследований, изобретательства и инновационной деятельности в машиностроении : практикум по одной дисциплине для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» днев. и заоч. форм обучения / И. В. Царенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2013. – 40 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://library.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-163-5.

Рассмотрены методы статистической обработки экспериментальных данных; планирования эксперимента; корреляционно-регрессионного анализа; поисковой оптимизации Гаусса–Зайделя.

Для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.002(075.8)
ББК 30я73

ISBN 978-985-535-163-5

© Царенко И. В., 2013
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2013

Практическая работа № 1

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: практическое освоение выборочного метода статистической обработки результатов прямых измерений.

Основные положения

Генеральная совокупность и выборка – два фундаментальных понятия статистической теории. Генеральная совокупность – это совокупность всех возможных результатов наблюдений случайной величины, которые в принципе могут быть проведены при данных условиях. Генеральная совокупность – теоретическое понятие, так как проведение неограниченно большого количества испытаний невозможно. Поэтому на практике приходится использовать ограниченное число измерений, которое получило название выборки. Выборка – набор значений случайной величины, полученный в результате наблюдений. Число элементов выборки называют ее объемом и обычно обозначают n . Смысл статистической обработки экспериментальных данных заключается в том, чтобы по выборке ограниченного объема n , т. е. лишь по некоторой части генеральной совокупности, высказать обоснованное суждение об ее свойствах в целом.

Экспериментальные данные получают в результате измерений, которые разделяют на *прямые* и *косвенные*. В данной работе рассматриваются прямые измерения.

При прямых измерениях искомое значение величины находят непосредственно в процессе измерения. К прямым относятся измерения линейных размеров линейками, штангенциркулями, микрометрами и т. д., измерения масс на рычажных весах с помощью гирь, измерения времени с помощью часов или секундомера, температуры – термометром, силы тока – амперметром и т. п. Однако полученное таким образом значение не есть истинное значение измеряемой величины, так как оно всегда содержит ошибку (или погрешность) измерения Δ . Ошибки измерения подразделяются на *систематические*, *случайные* и *грубые* (промахи).

Систематическая ошибка (Δ_c) – величина, которая остается постоянной на протяжении одной серии измерений или изменяется закономерно. В качестве основных составляющих систематической

ошибки обычно рассматривают ошибки средства измерения, округления, методические и субъективные (зависящие от индивидуальных особенностей человека, занятого измерениями). Часто ошибки средства измерения составляют большую часть систематической ошибки и, как правило, легко могут быть определены. Методические погрешности возникают из-за несовершенства метода измерений, влияния условий измерений на их результаты.

Случайная ошибка ($\Delta_{сл}$) изменяется от одного измерения к другому непредсказуемо. Ее рассматривают как суммарный эффект многих факторов, действие которых столь мало, что их нельзя выделить и учесть по отдельности. Примеры: колебание температуры в процессе измерения; незначительное движение воздуха; колебание почвы.

Методические указания

Методика статистической обработки результатов прямых измерений рассмотрена на примере оценки истинного значения измеряемой микрометром толщины кольца B .

Истинное значение измеряемой величины (толщина кольца B) представляется в виде выражения:

$$B = \bar{B} \pm \Delta_{\Sigma}, \text{ вероятность } P = p, \quad (1.1)$$

где \bar{B} – точечная оценка измеряемой величины B , вычисляемая как среднее арифметическое значение n измерений:

$$\bar{B} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i, \quad (1.2)$$

b_i – результат i -го измерения; Δ_{Σ} – суммарная погрешность или ширина доверительного интервала, в котором с вероятностью p будет находиться истинное значение измеряемой величины B .

В вероятностном выражении уравнение (1.3) запишется:

$$P(\bar{B} - \Delta_{\Sigma} < B < \bar{B} + \Delta_{\Sigma}) = p. \quad (1.3)$$

Погрешность Δ_{Σ} определяется как сумма систематической погрешности Δ_c и случайной ошибки измерения $\Delta_{сл}$:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_c + \Delta_{сл}. \quad (1.4)$$

Учитывая, что систематическая ошибка состоит из ошибки средства измерения, округления, методической и субъективной, то суммарную систематическую ошибку Δ_c можно найти по формуле

$$\Delta_c = k \sqrt{\sum_{j=1}^m \Delta_{c_j}^2}, \quad (1.5)$$

где k – поправочный коэффициент; m – число элементарных систематических погрешностей.

При несложном линейном измерении как, например, в данной лабораторной работе, измерение толщины кольца микрометром, систематическая ошибка будет определяться ошибкой средства измерения.

$$\Delta_c = \Delta_{\text{ср.изм.}} \quad (1.6)$$

Если на шкале прибора указан класс точности (равный приведенной погрешности γ_n), то ошибка средств измерения рассчитывается по формуле

$$\Delta_{\text{ср.изм.}} = \gamma_n A / 100 \%, \quad (1.7)$$

где A – верхний предел измерения на шкале прибора.

Если на шкале прибора не указан класс точности, то ошибка средств измерения рассчитывается по формуле

$$\Delta_{\text{ср.изм.}} = 0,2a, \quad (1.8)$$

где a – цена деления измерительного прибора.

Случайную ошибку измерений $\Delta_{\text{сл}}$ можно определить после многократных измерений по формуле

$$\Delta_{\text{сл}} = t_{\alpha, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (1.9)$$

где $t_{\alpha, n-1}$ – коэффициент Стьюдента, приведен в табл. 1.1; n – число измерений; α – вероятность так называемой ошибки I-го рода: $\alpha = 1 - p$; S – среднее квадратичное отклонение результатов измерений:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (b_i - \bar{B})^2}{n-1}}. \quad (1.10)$$

Здесь b_i – результат i -го измерения; \bar{B} – среднее арифметическое значение n измерений, определяемое по формуле (1.2).

Для более точного расчета S используется формула

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(b_i - b_0)^2 - n(\bar{B} - b_0)^2]}{n-1}}, \quad (1.11)$$

где b_0 – одно из значений b_i . В качестве b_0 принимают минимальное число из выборки, как наиболее удобное для вычитания из значений b_i . Например, если $b_i = 1,80; 1,81; 1,82\dots$, то $b_0 = 1,80$.

Таблица 1.1

Значение коэффициентов Стьюдента $t_{\alpha, n-1}$

$n-1$	α				$n-1$	α			
	0,1	0,05	0,01	0,001		0,1	0,05	0,01	0,001
1	6,314	12,70	63,65	636,6	6	1,943	2,447	3,707	5,959
2	2,920	4,303	9,925	31,59	7	1,895	2,365	3,449	5,405
3	2,353	3,182	5,841	12,94	8	1,860	2,306	3,355	5,041
4	2,132	2,776	4,604	8,610	9	1,833	2,262	3,250	4,781
5	2,016	2,571	4,032	6,849	10	1,812	2,228	3,169	4,587

При выполнении измерений может быть поставлена задача либо оценить вероятность того, что результаты отдельных измерений находятся в определенном интервале, либо установить доверительный интервал по известной вероятности. Для решения этих задач используют значения функции Лапласа, рассчитываемые по формуле

$$\gamma = \Delta/S, \quad (1.12)$$

где Δ – допускаемая погрешность измерений или $\Delta = \pm(b_{\max} - b_{\min})/2$; S – среднеквадратичное отклонение.

По табл. 1.2 определяется доверительная вероятность P , соответствующая рассчитанному γ , или наоборот, по известному P устанавливается γ , а затем по формуле (1.12) рассчитывается Δ .

Таблица 1.2

Значение вероятностей для нормального распределения

$\gamma = \Delta/S$	P	$\gamma = \Delta/S$	P	$\gamma = \Delta/S$	P
0	0	1,2	0,77	2,6	0,990
0,05	0,04	1,3	0,80	2,7	0,993
0,1	0,08	1,4	0,84	2,8	0,995
0,15	0,12	1,5	0,87	2,9	0,996
0,2	0,16	1,6	0,89	3,0	0,9973

Окончание табл. 1.2

$\gamma = \Delta/S$	P	$\gamma = \Delta/S$	P	$\gamma = \Delta/S$	P
0,3	0,24	1,7	0,91	3,1	0,9981
0,4	0,31	1,8	0,93	3,2	0,9986
0,5	0,38	1,9	0,94	3,3	0,9990
0,6	0,45	2,0	0,95	3,4	0,9993
0,7	0,51	2,1	0,964	3,5	0,9995
0,8	0,57	2,2	0,972	3,6	0,9997
0,9	0,63	2,3	0,978	3,7	0,9998
1,0	0,68	2,4	0,984	3,9	0,9999
1,1	0,73	2,5	0,988	4,0	0,99993

Так, например, для $\gamma = 0,4$ доверительная вероятность $P = 0,31$. Это означает, что 1/3 результатов всех измерений находится в интервале $\pm\Delta$. С увеличением интервала Δ доверительная вероятность P возрастает.

На практике часто важно знать, какой доверительный интервал нужно выбрать для некоторого ряда измерений, чтобы 95 % (или другое значение P) результатов попадали в него. Из табл. 1.2 находим, что значению $P = 0,95$ соответствует значение $\Delta/S = 2$. Отсюда Δ рассчитывается как $2S$, т. е. в интервал $B = \bar{B} \pm 2S$ попадает 95 % возможных значений измеряемой величины.

Порядок выполнения работы

1. Из партии деталей, представленных в табл. 1.3, сделать две выборки в n штук ($n = 5, 10$); результаты измерений микрометром толщины каждой детали (b_i) занести в таблицу (по форме табл. 1.4).

Таблица 1.3

Протокол измерения толщины колец

№ п/п	b_i , мм	№ п/п	b_i , мм	№ п/п	b_i , мм	№ п/п	b_i , мм	№ п/п	b_i , мм
1	5,60	21	5,63	41	5,63	61	5,62	81	5,59
2	5,63	22	5,65	42	5,65	62	5,64	82	5,62
3	5,65	23	5,64	43	5,66	63	5,63	83	5,66
4	5,61	24	5,61	44	5,64	64	5,66	84	5,64
5	5,64	25	5,64	45	5,63	65	5,63	85	5,60
6	5,66	26	5,64	46	5,66	66	5,67	86	5,61
7	5,62	27	5,62	47	5,64	67	5,65	87	5,67
8	5,65	28	5,65	48	5,61	68	5,63	88	5,68

Окончание табл. 1.3

№ п/п	b_i , мм	№ п/п	b_i , мм	№ п/п	b_i , мм	№ п/п	b_i , мм	№ п/п	b_i , мм
9	5,66	29	5,64	49	5,65	69	5,66	89	5,63
10	5,62	30	5,63	50	5,63	70	5,64	90	5,65
11	5,64	31	5,64	51	5,63	71	5,63	91	5,64
12	5,66	32	5,63	52	5,64	72	5,64	92	5,68
13	5,65	33	5,65	53	5,62	73	5,65	93	5,69
14	5,63	34	5,64	54	5,65	74	5,64	94	5,67
15	5,66	35	5,61	55	5,64	75	5,65	95	5,66
16	5,60	36	5,64	56	5,62	76	5,62	96	5,68
17	5,66	37	5,62	57	5,65	77	5,67	97	5,60
18	5,64	38	5,65	58	5,64	78	5,68	98	5,64
19	5,66	39	5,61	59	5,66	79	5,65	99	5,67
20	5,61	40	5,64	60	5,63	80	5,68	100	5,61

Таблица 1.4

Результаты измерений и расчетов

№ п/п	b_i , мм	\bar{B} , мм, (1.2)	Δ_c (1.5)– (1.8)	S (1.10) S (1.11)	$\Delta_{сл}$ (1.9), (1.10) $\Delta_{сл}$ (1.9), (1.11)	Δ_Σ (1.4), (1.10) Δ_Σ (1.4), (1.11)
1						
2						
...						
5						
6						
7						
...						
10						

2. С заданной преподавателем вероятностью оценить для каждой выборки:

- 1) точечную оценку измеряемой величины \bar{B} по формуле (1.2);
- 2) систематическую ошибку измерений Δ_c по формулам (1.5)–(1.8);
- 3) случайную ошибку измерений $\Delta_{сл}$ по формулам (1.9)–(1.11).

Расчет $\Delta_{сл}$ выполнить двумя методами: грубый расчет по формулам (1.9), (1.10) и точный по формулам (1.9), (1.11);

- 4) суммарную ошибку измерений Δ_Σ (1.4).

3. Результаты вычислений занести в табл. 1.4.

4. Результаты измерений для обеих партий представить в виде, соответствующем уравнению (1.1).

5. Используя формулу (1.12) и табл. 1.2, рассчитать для партии в 10 колец интервал Δ , в котором будут находиться результаты измерений с заданной преподавателем вероятностью.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Методика статистической обработки результатов прямых измерений на примере оценки истинного значения толщины кольца B , включая форму представления истинного значения измеряемой величины; формулы расчета точечной оценки измеряемой величины \bar{B} , систематической ошибки измерений Δ_c , случайной ошибки измерений $\Delta_{сл}$, суммарной ошибки измерений Δ_{Σ} .
3. Таблица результатов измерений и расчетов по форме табл. 1.4, включающая расчет случайной ошибки измерений для обеих выборок двумя методами:
 - 1) грубый расчет по уравнениям (1.9), (1.10);
 - 2) точный расчет по уравнениям (1.9), (1.11). Соответственно двумя методами оценивается и Δ_{Σ} .
4. Результаты измерений для обеих партий деталей в виде, соответствующем уравнению (1.1).
5. Для партии из 10 деталей расчеты: 1) вероятности попадания измерений в заданный преподавателем интервал; 2) доверительного интервала для заданной вероятности. Расчеты выполняются с использованием значений функции Лапласа (представленные в табл. 1.2) и формулы (1.12).
6. Выводы: 1) сравнить значения Δ_{Σ} , рассчитанные двумя методами; 2) оценить, как влияет количество измерений на различные ошибки измерений; 3) оценить доверительный интервал при изменении вероятности попадания размеров в этот интервал.

Контрольные вопросы

1. Смысл статистической обработки экспериментальных данных.
2. Генеральная совокупность и выборка. Определения.
3. Классификация измерений.
4. Прямые измерения. Примеры.
5. Виды ошибок измерений.
6. Виды систематических ошибок измерений.
7. Расчет систематической ошибки средства измерений.
8. Расчет случайной ошибки измерения.
9. Влияние числа измерений на случайную и систематическую ошибки.

10. Расчет среднего квадратичного отклонения результатов измерений.

11. Форма представления результатов измерений.

12. Как определить вероятность того, что результаты отдельных измерений будут находиться в заданном интервале измерения?

Практическая работа № 2 МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: практическое освоение методов статистической обработки результатов косвенных измерений.

Основные положения

Значение косвенно измеряемой величины y вычисляется по уравнению, включающему результаты прямых измерений x_1, x_2, \dots, x_m :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m; a, b \dots), \quad (2.1)$$

где $a, b \dots$ – физические константы и постоянные приборов.

Например, площадь прямоугольника S находится путем измерения длин двух его сторон l_1 и l_2 по соотношению $S = l_1 \times l_2$. В этом случае измерение длины сторон будет прямым, а измерение площади прямоугольника – косвенным.

Как и для случая прямых измерений, истинное значение косвенно измеряемой величины y записывается в виде:

$$y = \bar{y} \pm \Delta_{y\Sigma}, \text{ вероятность } P = p, \quad (2.2)$$

где \bar{y} – точечная оценка измеряемой величины y , вычисляемая как среднее арифметическое значение n измерений; $\Delta_{y\Sigma}$ – суммарная погрешность или ширина доверительного интервала, в котором с вероятностью p будет находиться истинное значение измеряемой величины y .

При косвенных измерениях существует два метода расчета y .

Метод I

1.1. Расчет точечной оценки \bar{y} .

1.1.1. Вычисление значений $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ – средних арифметических результатов прямых измерений.

1.1.2. Подстановка значений $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ в уравнение

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m; a, b \dots). \quad (2.3)$$

1.2. Расчет суммарной погрешности $\Delta_{y\Sigma}$.

1.2.1. Принимается допущение $\Delta_{y\Sigma}^2 = D(y)$, где $D(y)$ – дисперсия функции (2.1) случайных независимых аргументов:

$$\Delta_{y\Sigma}^2 = D(y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 D(x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 D(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m}\right)^2 D(x_m), \quad (2.4)$$

где $\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_m}$ – частные производные функции (2.1) по переменным x_1, x_2, \dots, x_m соответственно, а $D(x_1), D(x_2), \dots, D(x_m)$ – дисперсии при измерении величин x_1, x_2, \dots, x_m :

$$D(x_i) = \Delta_{x\Sigma}^2, \quad (2.5)$$

где $\Delta_{x\Sigma}$ – суммарная погрешность измеряемой величины x_i (подробный расчет приведен в практической работе № 1).

Напомним, что частная производная функции многих переменных по одной переменной, скажем x_1 , является обычной производной этой функции по x_1 , причем другие переменные x_2, \dots, x_m считаются постоянными параметрами. Все производные в выражении (2.4) вычисляются при средних арифметических значениях переменных, т. е. при $\bar{x}_1 = \bar{x}_1, \bar{x}_2 = \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m = \bar{x}_m$. Зависимость (2.4) получена путем разложения функции (2.1) в ряд Тейлора, при котором ограничились лишь линейными членами разложения.

Метод II

2.1. Расчет точечной оценки \bar{y} .

2.1.1. Вычисление y_j для каждого из значений $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}$ по (2.1);

2.1.2. Расчет среднего арифметического значения \bar{y} :

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_j,$$

где n – число прямых измерений.

2.2. Расчет суммарной погрешности $\Delta_{y\Sigma}$.

2.2.1. Вычисление y_j для каждого из $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}$ по формуле (2.1).

2.2.2. Расчет $\Delta_{y\Sigma}$ по формуле

$$\Delta_{y\Sigma} = t_{\alpha, n-1} \frac{S_y}{\sqrt{n}}, \quad (2.6)$$

где $t_{\alpha, n-1}$ – коэффициент Стьюдента (значения приведены в табл. 2.1); n – число измерений; α – вероятность так называемой ошибки I-го рода, рассчитываемая как $\alpha = 1 - P$; S_y – среднее квадратичное отклонение суммарной погрешности измерений y :

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}{n-1}. \quad (2.7)$$

Таблица 2.1

Значение коэффициентов Стьюдента $t_{\alpha, n-1}$

$n-1$	α				$n-1$	α			
	0,1	0,05	0,01	0,001		0,1	0,05	0,01	0,001
1	6,314	12,70	63,65	636,6	6	1,943	2,447	3,707	5,959
2	2,920	4,303	9,925	31,59	7	1,895	2,365	3,449	5,405
3	2,353	3,182	5,841	12,94	8	1,860	2,306	3,355	5,041
4	2,132	2,776	4,604	8,610	9	1,833	2,262	3,250	4,781
5	2,016	2,571	4,032	6,849	10	1,812	2,228	3,169	4,587

Если погрешности измерений малы по сравнению с измеряемым значением величины (это условие положено в основу всех формул), то оба способа дают одинаковые результаты. Однако в силу меньшей трудоемкости вычислений первый способ предпочтительней.

В табл. 2.2 приведены формулы для расчета погрешности результатов косвенных измерений $\Delta_{y\Sigma}$ для некоторых простейших функций, полученные в результате подстановки y в уравнение (2.4).

Таблица 2.2

Значения $\Delta_{y\Sigma}$ для различных функций $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$

Вид функции	Значение $\Delta_{y\Sigma}$
$y = x_1 + x_2$	$\Delta_y = \sqrt{\Delta_{x_1}^2 + \Delta_{x_2}^2}$
$y = x_1 \cdot x_2$	$\Delta_y = \sqrt{x_2^{-2} \cdot \Delta_{x_1}^2 + x_1^{-2} \cdot \Delta_{x_2}^2}$
$y = x_1 / x_2$	$\Delta_y = \sqrt{x_2^{-2} \cdot \Delta_{x_1}^2 + x_1^{-2} \cdot x_2^{-4} \cdot \Delta_{x_2}^2}$
$y = x^n$	$\Delta_y = n \cdot x^{n-1} \cdot \Delta_x$
$y = \sin x$	$\Delta_y = \Delta_x \cdot \cos x$
$y = \cos x$	$\Delta_y = \Delta_x \cdot \sin x$
$y = \operatorname{tg} x$	$\Delta_y = \Delta_x \cdot \cos^{-2} x$
$y = \operatorname{ctg} x$	$\Delta_y = \Delta_x \cdot \sin^{-2} x$
$y = \ln x$	$\Delta_y = \Delta_x \cdot x^{-1}$
$y = \lg x$	$\Delta_y = 0,4 \Delta_x \cdot x^{-1}$

Методические указания

Методы обработки результатов косвенных измерений рассмотрены на примере оценки микротвердости поверхности детали H_μ . На приборе ПМТ-3 проводится измерение микротвердости пяти деталей при нагрузке $F = 100$ г. При этом с прибора считывается не непосредственно само значение микротвердости H_μ (МПа), а диаметр d (мкм) отпечатка индентора в детали. Далее, микротвердость может быть определена по формуле

$$H_\mu = \frac{18540 \cdot F}{0,3d^2}, \quad (2.8)$$

где F – нагрузка, г. Учитывая, что измерение проводится при $F = 100$ г, формула упрощается:

$$H_\mu = \frac{18540 \cdot 100}{0,3d^2} = \frac{618 \cdot 10^4}{d^2}. \quad (2.9)$$

Окончательный результат измерений должен быть представлен в виде:

$$H_\mu = \bar{H}_\mu \pm \Delta_{H_\mu}, \text{ вероятность } P = p. \quad (2.10)$$

Как было описано выше (в разделе «Основные положения»), существует два метода определения неизвестной правой части этого равенства.

Метод I – обработка результатов косвенных измерений с учетом математической зависимости между значением измеряемой величины и результатами прямых измерений.

1.1. Расчет среднего арифметического значения \bar{H}_μ .

1.1.1. Вычисление \bar{d} :

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i, \quad (2.11)$$

где d_i – измеряемый размер отпечатка, мкм.

1.1.2. \bar{H}_μ вычисляются, используя \bar{d} , по известной формуле

$$\bar{H}_\mu = \frac{618 \cdot 10^4}{\bar{d}^2}. \quad (2.12)$$

1.2. Расчет суммарной погрешности ΔH_μ ($\Delta_{y\Sigma}$).

Для оценки погрешности ΔH_μ при определении микротвердости H_μ используется формула (2.4) с учетом приближения $\Delta^2 = D$. Тогда

$$\Delta_{H_\mu} = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial d} \Delta d_\Sigma\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial f} \Delta f_\Sigma\right)^2}, \quad (2.13)$$

где Δf_Σ – погрешность определения массы груза индентора, равная 0,001; Δd_Σ – суммарная погрешность измерения диаметра отпечатка d_i , рассчитываемая по формулам из практической работы № 1, а именно:

$$\Delta d_\Sigma = \Delta d_c + \Delta d_{\text{сл}}. \quad (2.14)$$

Систематическая ошибка измерения, образуемая погрешностью прибора при измерении диаметра отпечатка, $\Delta d_c = 0,5$.

Случайная ошибка измерения $\Delta d_{\text{сл}}$ рассчитывается по формуле

$$\Delta d_{\text{сл}} = t_{\alpha, n-1} \frac{S_d}{\sqrt{n}}, \quad (2.15)$$

где

$$S_d^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2}{n-1}. \quad (2.16)$$

Метод II – обработка результатов косвенных измерений как прямых, т. е. используется та же методика, как при обработке результатов прямых измерений.

2.1. Расчет точечной оценки \bar{H}_μ .

2.1.1. Вычисление $H_{\mu j}$ для каждого из значений d_j (d_1, d_2, \dots, d_m):

$$H_{\mu j} = \frac{618 \cdot 10^4}{d_j^2}. \quad (2.17)$$

2.1.2. Расчет среднего арифметического значения \bar{H}_μ :

$$\bar{H}_\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{\mu j}, \quad (2.18)$$

где n – число прямых измерений.

2.2. Расчет суммарной погрешности Δ_{H_μ} ($\Delta_{y\Sigma}$).

2.2.1. Вычисление $H_{\mu j}$ для каждого d_j аналогично пп. 2.1.1.

2.2.2. Расчет $\Delta_{H\mu}$ по формуле

$$\Delta_{H\mu} = t_{\alpha, n-1} \frac{S_H}{\sqrt{n}}, \quad (2.19)$$

где $t_{\alpha, n-1}$ – коэффициент Стьюдента (значения приведены в табл. 2.1); n – число измерений; α – вероятность ошибки I-го рода, рассчитываемая как $\alpha = 1 - p$; S_H – среднее квадратичное отклонение суммарной погрешности измерений H_{μ} .

При $n \leq 30$

$$S_H = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (H_{\mu j} - \overline{H_{\mu}})^2}{n-1}}. \quad (2.20)$$

Порядок выполнения работы

1. Значения измерений диаметра отпечатка (d_i , мкм) выбрать из табл. 2.3 согласно варианту, указанному преподавателем.

Таблица 2.3

Протокол измерения диаметра отпечатка d_i

Вариант	d_i , мкм	Вариант	d_i , мкм	Вариант	d_i , мкм	Вариант	d_i , мкм	Вариант	d_i , мкм
1	10	7	77	13	37	19	97	25	48
	15		74		39		91		54
	11		70		40		94		52
	12		75		38		96		51
	11		72		38		98		49
2	23	8	85	14	48	20	111	26	57
	20		82		49		113		60
	21		86		48		109		63
	25		80		50		104		61
	22		81		46		110		58
3	30	9	94	15	56	21	8	27	66
	32		90		58		13		71
	31		91		61		14		73
	30		97		63		9		68
	34		92		54		11		69
4	43	10	101	16	67	22	19	28	77
	42		103		65		22		79
	47		107		69		20		83
	41		104		68		18		84
	44		105		70		19		81

Окончание табл. 2.3

Вариант	d_i , мкм	Вариант	d_i , мкм	Вариант	d_i , мкм	Вариант	d_i , мкм	Вариант	d_i , мкм
5	53	11	19	17	76	23	27	29	88
	56		18		78		31		93
	50		14		81		30		89
	51		17		79		32		88
	53		20		79		29		90
6	64	12	28	18	88	24	39	30	97
	60		25		89		42		101
	61		27		90		41		99
	63		29		91		38		104
	62		30		87		44		102

2. Рассчитать \bar{H}_μ и ΔH_μ двумя методами, заполнить таблицы по форме табл. 2.4 и 2.5. Методика расчетов представлена в разделах «Основные положения» и «Методические указания».

Таблица 2.4

Результаты измерений и расчетов по методу I

n	d_i , мкм	\bar{d} (2.11)	\bar{H}_μ (2.12)	S_d (2.16)	$\Delta d_{\text{сл}}$ (2.15)	Δd_c	Δd_Σ (2.14)	Δf_Σ	ΔH_μ (2.13)
1									
2									
...									
5									

Таблица 2.5

Результаты измерений и расчетов по методу II

n	d_i , мкм	$H_{\mu j}$ (2.17)	\bar{H}_μ (2.18)	S_H (2.20)	ΔH_μ (2.19)
1					
2					
...					
5					

3. Сравнить результаты, полученные различными методами.

4. Для указанного преподавателем варианта условий косвенных измерений (табл. 2.6) рассчитать \bar{y} , Δy_Σ по первому методу. Результат записать по форме уравнения (2.2).

Задания для оценки погрешности косвенных измерений

№ п/п	Вид функции $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$	\bar{x}_1	\bar{x}_2	Δx_1	Δx_2
1	$y = 15x_1$	10	–	0,1	–
2	$y = 15x_1/x_2$	14	4	1,5	0,6
3	$y = 0,2x_1 + 2,1x_2$	12	100	1,2	5
4	$y = 2,1 \ln x_1 + 0,2 \sin x$	12	15	0,3	1,1
5	$y = 3,5x_1 + 0,8x_1^2$	2,6	–	0,4	–
6	$y = 0,2x_1 + 0,7x_2 + 1,1x_1x_2$	4	6	0,2	0,3
7	$y = 2,1x^2$	5	–	0,1	–
8	$y = 7,3^x$	2	–	0,01	–
9	$y = 1,1 + 2,3x_1x_2$	3,5	6,8	0,1	0,2
10	$y = 1,2x_1x_2 + 2,3x_1^2 + \frac{1}{x^2}$	10	15	0,5	0,3

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Описание выборочного метода статистической обработки результатов косвенных измерений (методика определения истинного значения измеряемой величины y при косвенных измерениях), включая форму представления истинного значения измеряемой величины; формулы расчета точечной оценки измеряемой величины $\bar{y}(\bar{H}_\mu)$, и суммарной ошибки измерений $\Delta_{y\Sigma}(\Delta_{H_\mu})$ двумя методами.
3. Таблицы результатов измерений d_i и расчетов по форме табл. 2.4 и 2.5, включающие результаты расчетов точечной оценки \bar{H}_μ и погрешности измерений Δ_{H_μ} двумя методами.
4. Окончательный результат измерений, представленный по форме уравнения (2.10) для обоих методов.
5. Расчеты y , $\Delta_{y\Sigma}$ по методу I для указанного преподавателем варианта задачи из табл. 2.6; окончательный результат измерения y по форме уравнения (2.2).
6. Выводы о сопоставимости данных, полученных методами I и II.

Контрольные вопросы

1. Какие измерения являются косвенными? Примеры.
2. Цель выборочного метода статистической обработки результатов косвенных измерений.

3. Расчет точечной оценки измеряемой величины по методу I.
4. Расчет суммарной погрешности косвенного измерения $\Delta_{y\Sigma}$ по методу I.
5. Расчет точечной оценки измеряемой величины по методу II.
6. Расчет суммарной погрешности косвенного измерения $\Delta_{y\Sigma}$ по методу II.
7. Форма записи результата косвенных измерений.

Практическая работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ (V, S) НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ КОРРЕЛЯЦИОННО-РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА (КРА)

Цель работы: практическое освоение методик планирования эксперимента и корреляционно-регрессионного анализа (КРА) при исследовании влияния режимов шлифования (скорости и подачи) на шероховатость обработанной поверхности детали.

Основные положения

Корреляционный анализ изучает закон поведения случайной величины (Y) в зависимости от других случайных величин (x_1, x_2, \dots, x_n). Аналитическая форма представления корреляционной зависимости реализуется с помощью уравнения регрессии. В математической статистике для описания неизвестных функций наиболее часто используют полиномиальные модели. Степень полинома определяется максимальной степенью входящих в него переменных. Например, для однофакторной задачи: полином нулевой степени $y = b_0$, полином первой степени $y = b_0 + b_1x$, полином второй степени $y = b_0 + b_1x + b_{11}x_2$ и т. д.

Порядок выполнения работы

1. *Цель исследования*
2. *Выбор полиномиальной модели*

На первом этапе КРА исследователь должен выбрать модель для описания исследуемой функции. Выбор осуществляется на основании подробного анализа либо литературных данных (возможно патентной проработки), либо предыдущих опытных результатов. Если исследование в данной области проводится впервые, то выбирают простейший полином. Полиномиальная модель удобна, так как позволяет постепенно увеличивать степень точности аппроксимации за счет повышения порядка полинома.

Данная практическая работа посвящена решению двухфакторной задачи: выведению уравнения, отражающего корреляцию шероховатости обработанной поверхности детали со скоростью и подачей при шлифовании. Поэтому в качестве уравнения регрессии можно попробовать линейный двухфакторный полином первой степени:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2, \quad (3.1)$$

где Y – параметр шероховатости (Ra); b_0, b_1, b_2 – коэффициенты уравнения регрессии; x_1 – скорость резания; x_2 – подача. После конкретизации факторов уравнение (3.1) примет вид:

$$Ra = b_0 + b_1v + b_2s. \quad (3.2)$$

3. Выдвижение гипотезы

4. Планирование эксперимента

При планировании эксперимента исследователь должен выбрать метод планирования и определить основные условия эксперимента.

4.1. *Выбор метода планирования* зависит в основном от количества регулируемых факторов, задачи эксперимента, экономических затрат на проведение эксперимента.

В данной практической работе проводится двухфакторный эксперимент, поэтому целесообразно выбрать метод полного факторного плана (ПФП). Для ПФП количество экспериментов рассчитывается по формуле $n = 2^k$, где k – количество факторов. В случае планирования двухфакторного эксперимента требуемое количество опытов $n = 2^2 = 4$. Каждому фактору присваивается кодовое значение (скорость резания – X_1 ; подача – X_2).

4.2. *Определение условий эксперимента.* К числу основных условий эксперимента можно отнести: область экспериментирования, основной уровень исследуемых факторов и интервал варьирования исследуемых факторов. Выбор области экспериментирования осуществляют, учитывая:

а) ограничения уровней факторов, обусловленные их физической природой (например: предел прочности материала, температура плавления и т. д.), применяемым оборудованием (предельные значения подачи станка, частот вращения и т. д.), технико-экономическими соображениями;

б) имеющуюся априорную информацию, полученную в аналогичных, ранее проведенных исследованиях.

Выбор основного уровня исследуемого фактора X_{0i} (иначе нулевой точки) зависит от решаемой задачи. Если задачей эксперимента является описание процесса (интерполяция), то за нулевую точку принимается середина интервала изменения данного фактора. В задачах оптимизации некоторого параметра нулевую точку нужно располагать как можно ближе к положению, обеспечивающему оптимум параметра, т. е. на основе предварительных опытов выбирается наилучшее значение.

При выборе интервала варьирования уровня фактора X_i учитываются ограничения «сверху» и «снизу». Ошибка, с которой фиксируется уровень фактора, является ограничением «снизу». Предел области определения фактора устанавливает верхнюю границу интервала варьирования: если интервал варьирования составляет не более 10 % от области определения фактора, то интервал считают узким; не более 30 % – средним; в остальных случаях – широким. Как правило, уровни фактора (верхний и нижний) выбирают симметричными относительно нулевой точки (основного уровня X_{0i}). В этом случае верхний уровень фактора (кодовое обозначение +1) определяется как $X_0 + \Delta$, нижний уровень (кодовое обозначение -1) определяется как $X_0 - \Delta$. Каждый столбец в матрице планирования (МП) называется вектор-столбцом, а каждая строка в МП – соответственно, вектор-строкой.

В данной практической работе значения основных уровней варьирования X_{i0} для скорости (V_0) и подачи (S_0), интервалов варьирования для скорости (Δ_v) и подачи (Δ_s) представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Условия эксперимента

Вариант	V_0 , м/мин	Δ_v , м/мин	S_0 , мм/ход	Δ_s , мм/ход	Вариант	V_0 , м/мин	Δ_v , м/мин	S_0 , мм/ход	Δ_s , мм/ход
1	100	10,0	1,0	0,1	16	1600	160	1,6	0,1
2	200	20,0	2,0	0,2	17	1700	170	1,7	0,2
3	300	30,0	3,0	0,3	18	1800	180	1,8	0,3
4	400	40,0	4,0	0,4	19	1900	190	1,9	0,4
5	500	50,0	5,0	0,5	20	2000	200	2,0	0,5
6	600	60,0	6,0	0,6	21	2100	210	2,1	0,6
7	700	70,0	7,0	0,7	22	2200	220	2,2	0,7
8	800	80,0	8,0	0,8	23	2300	230	2,3	0,8
9	900	90,0	9,0	0,9	24	2400	240	2,4	0,9
10	1000	10,0	10,0	1,0	25	2500	250	2,5	1,0
11	1100	11,0	11,0	2,0	26	2600	260	2,6	1,1
12	1200	12,0	12,0	3,0	27	2700	270	2,7	1,2
13	1300	13,0	13,0	4,0	28	2800	280	2,8	1,3
14	1400	14,0	14,0	5,0	29	2900	290	2,9	1,4
15	1500	15,0	15,0	6,0	30	3000	300	3,0	1,5

4.3. Составление матрицы планирования в действительных значениях

Матрица планирования (МП) указывает, при каких значениях факторов (в случае данной практической работы, при каких значениях

скорости и подачи) проводится эксперимент. Кодовые значения факторов скорости и подачи (верхний уровень фактора обозначен «+1», нижний уровень фактора обозначен «-1» для проведения четырех экспериментов по методу ПФП представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Матрица планирования

Номер опыта	Факторы			
	V, м/мин		S, мм/ход	
	Кодовое значение, X_{1j}	Действительное значение, V_j	Кодовое значение, X_{2j}	Действительное значение, S_j
1	+1		+1	
2	+1		-1	
3	-1		+1	
4	-1		-1	

Действительные значения факторов (V_j, S_j) связаны с кодированными значениями факторов (X_{1j}, X_{2j}) следующими соотношениями:

скорость

$$V_j = V_0 + x_{1j} \cdot \Delta_v, \quad (3.3)$$

подача

$$S_j = S_0 + x_{2j} \cdot \Delta_s, \quad (3.4)$$

где V_0, S_0 – основные уровни варьирования скорости и подачи (табл. 3.1); X_{1j}, X_{2j} – кодированные значения соответственно скорости и подачи, представленные в табл. 3.2; Δ_v, Δ_s – интервалы варьирования скорости и подачи в эксперименте (табл. 3.1).

5. Проведение виртуального эксперимента

В соответствии с матрицей планирования проводится виртуальный эксперимент: шлифование образцов из стали 45 на плоскошлифовальном станке 3E711B. После шлифования образца с помощью профилографа-профилометра определяется высота микронеровностей поверхности $Ra(y_j)$. Для каждого режима шлифования (V_j, S_j) проводится серия из трех параллельных опытов. Результаты первой, второй и третьей реализации матрицы планирования представлены в табл. 3.3 как y_{j1}, y_{j2}, y_{j3} .

Результаты эксперимента

Вариант	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}	Вариант	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}
1	10	11	12	9	160	162	169
	21	19	23		171	174	177
	32	35	39		184	187	189
	47	43	45		195	194	199
2	52	59	50	10	207	200	202
	67	68	70		210	212	210
	78	71	75		223	227	220
	89	84	89		232	233	231
3	93	95	99	11	247	249	216
	107	101	100		254	247	223
	110	111	119		260	200	215
	123	120	123		271	265	213
4	134	133	130	12	288	280	270
	149	142	148		293	281	219
	151	150	158		300	304	371
	107	101	100		254	247	223
5	32	35	39	13	184	187	189
	47	43	45		195	194	199
	52	59	50		207	200	202
	67	68	70		210	212	210
6	78	71	75	14	223	227	220
	89	84	89		232	233	231
	93	95	99		247	249	216
	107	101	100		254	247	223
7	110	111	119	15	260	200	215
	123	120	123		271	265	213
	134	133	130		288	280	270
	149	142	148		293	281	219
8	151	150	158	16	300	304	371
	107	101	100		254	247	223
	32	35	39		184	187	189
	47	43	45		195	194	199

6. Обработка результатов эксперимента

6.1. Расчет среднего арифметического значения шероховатости \bar{y}_j

Для каждой серии параллельных опытов вычисляется среднее арифметическое значение полученного результата \bar{y}_j по формуле

$$\bar{y}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_{ji}, \quad (j = 1, 2, \dots, k), \quad (3.5)$$

где k – число параллельных опытов, проводимых при одинаковых условиях.

6.2. Расчет дисперсии

Для каждой серии параллельных опытов дисперсия (средне-квадратичное отклонение) определяется по формуле

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_{ji} - \bar{y}_j)^2. \quad (3.6)$$

7. Выведение уравнения регрессии

7.1. Проверка воспроизводимости опытов

Перед использованием экспериментальных данных для вычисления коэффициентов уравнения регрессии необходимо удостовериться в их корректности (отсутствии грубых и случайных ошибок) при выполнении эксперимента. Для этого выполняется проверка на воспроизводимость результатов опытов по критерию Кохрена. Процедура проверки сводится к сравнению табличного критерия Кохрена ($G_{\text{табл}}$) с расчетным (G_p) при определенной доверительной вероятности (например, при $P = 0,95$). Формула для расчета G_p :

$$G_p = \frac{S_{j\max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}, \quad (3.7)$$

где $S_{j\max}^2$ – максимальное значение дисперсии из j -й серии опытов.

$G_{\text{табл}}$ берется из табл. 3.4 в зависимости от n – общего количества оценок дисперсии и k – числа параллельных опытов.

Если $G_p > G_{\text{табл}}$, гипотеза воспроизводимости опытов отвергается и эксперимент повторяют, если $G_p \leq G_{\text{табл}}$, гипотеза воспроизводимости опытов принимается, и приступают к вычислению коэффициентов уравнения регрессии.

Значения критерия Кохрена при $P = 0,95$

n	$k - 1$			
	1	2	3	4
2	0,999	0,998	0,939	0,906
3	0,967	0,871	0,798	0,746
4	0,907	0,768	0,684	0,628
5	0,841	0,684	0,598	0,544
6	0,781	0,616	0,532	0,480
7	0,727	0,561	0,480	0,431
8	0,680	0,516	0,438	0,391
9	0,639	0,478	0,403	0,358
10	0,602	0,445	0,373	0,331
12	0,541	0,392	0,326	0,288
15	0,471	0,335	0,276	0,242
16	0,389	0,271	0,221	0,191

7.2. Расчет коэффициентов уравнения регрессии

Поскольку в качестве модели, описывающей зависимость шероховатости поверхности от скорости и подачи, был выбран линейный полином (3.1), то необходимо рассчитать всего три коэффициента: b_0 , b_1 (описывающий влияние скорости на шероховатость) и b_2 (описывающий влияние подачи на шероховатость). Для расчета этих коэффициентов используются формулы:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{y}_j; \quad (3.8)$$

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ji} \bar{y}_j, \quad (3.9)$$

где n – количество опытов ($n = 4$); X_{ji} – кодированное значение i -го фактора в j -м опыте.

7.3. Определение значимости коэффициентов регрессии

Для определения значимости коэффициентов регрессии используется критерий Стьюдента. Коэффициент регрессии статистически значим, если выполняется условие

$$|b_i| \geq t S_b, \quad (3.10)$$

где t – критерий Стьюдента, который выбирают из табл. 3.5 для доверительной вероятности $P = 0,95$; S_b – оценка дисперсии коэффициента регрессии:

$$S_b = \sqrt{\frac{S_{\bar{y}}^2}{n}}, \quad (3.11)$$

где $S_{\bar{y}}^2$ – оценка среднего значения дисперсии:

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{1}{kn} \sum_{j=1}^N S_j^2, \quad (3.12)$$

где k – число параллельных опытов; S_j^2 – дисперсии результатов реализации; n – количество опытов, проводимых при разных условиях ($n = 4$).

Таблица 3.5

**Значение коэффициента Стьюдента
при доверительной вероятности $P = 0,95$**

$n - 1$	T	$n - 1$	T	$n - 1$	T	$n - 1$	T
1	12,70	9	2,26	17	2,11	25	2,06
2	4,30	10	2,23	18	2,10	26	2,06
3	3,18	11	2,20	19	2,09	27	2,05
4	2,78	12	2,18	20	2,08	28	2,05
5	2,57	13	2,16	21	2,07	29	2,05
6	2,45	14	2,14	22	2,07	30	2,04
7	2,37	15	2,13	23	2,07	31	2,02
8	2,31	16	2,12	24	2,06	32	2,00

Если неравенство (3.10) не соблюдается, следовательно, коэффициент регрессии незначим, и соответствующий член можно исключить из уравнения регрессии. Анализируя значения и знак полученных коэффициентов уравнения регрессии b_1 и b_2 , можно сделать вывод о влиянии обоих факторов на высоту микронеровностей поверхности.

7.4. Запись уравнения регрессии

Запись уравнения регрессии осуществляется подстановкой значимых коэффициентов регрессии (b_0 , b_1 и b_2) с соответствующими знаками в уравнение (3.2).

8. Проверка адекватности

Проверка адекватности (соответствия) полученной зависимости экспериментальным данным осуществляется по результатам расчета критерия Фишера F_p и сравнения его с табличным значением $F_{\text{табл}}$ (табл. 3.6). Формула расчета F_p :

$$F_p = \frac{\max(S_{a.d.}^2; S_{\bar{y}}^2)}{\min(S_{a.d.}^2; S_{\bar{y}}^2)}, \quad (3.13)$$

где $S_{\bar{y}}^2$ – оценка среднего значения дисперсии, рассчитываемая по (3.12); $S_{a.d.}^2$ – оценка дисперсии адекватности, рассчитываемая по формуле

$$S_{a.d.}^2 = \frac{1}{n-B} \sum_{j=1}^n (y_j^p - y_j^э)^2, \quad (3.14)$$

где B – число значимых коэффициентов уравнения регрессии (3.2), включая свободный член (b_0); $y_j^э$ и y_j^p – экспериментальное и расчетное значения результатов реализации матрицы планирования в j -м опыте: $y_j^э = \bar{y}_j$; y_j^p определяются подстановкой в уравнение регрессии вместо значений V_j и S_j кодовых значений факторов x_{ij} из матрицы планирования (табл. 3.2).

В числителе уравнения (3.13) находится большая, а в знаменателе – меньшая из оценок дисперсии. Табличное значение критерия Фишера ($F_{\text{табл}}$) выбирают из табл. 3.6 для доверительной вероятности $P = 0,95$ и соответствующих n , k и B . При $F_p < F_{\text{табл}}$ уравнение регрессии считается адекватным экспериментальным данным. Если полученное уравнение неадекватно описывает эксперимент, то степень полиномиальной модели следует увеличить и расчет повторить.

Таблица 3.6

Значение критерия Фишера при $P = 0,95$

$n(k-1)$	$n-B$			
	1	2	3	4
6	5,99	5,14	4,76	4,53
7	5,59	4,74	4,35	4,12
8	5,32	4,46	4,07	3,84
9	5,12	4,26	3,86	3,63
10	4,96	4,10	3,71	3,48
11	4,84	3,98	3,59	3,36
12	4,75	3,88	3,49	3,26
13	4,67	3,80	3,41	3,18
14	4,60	3,74	3,34	3,11
15	4,54	3,68	3,29	3,06

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Описание методики КРА.
3. Выбор полиномиальной модели, выдвижение гипотезы.
4. Цель исследования, выбор метода планирования.
5. Определение условий эксперимента (табл. 3.1).
6. Составление матрицы планирования в действительных значениях по форме табл. 3.2.
7. Данные результатов эксперимента (табл. 3.3).
8. Данные обработки результатов эксперимента: расчет среднего арифметического значения шероховатости \bar{y}_j и дисперсии.
9. Выведение уравнения регрессии: проверка воспроизводимости опытов, расчет коэффициентов уравнения регрессии, определение значимости коэффициентов регрессии, запись уравнения регрессии.
10. Проверка адекватности (соответствия) полученной зависимости экспериментальным данным.
11. Выводы о влиянии обоих факторов на высоту микронеровностей поверхности.

Контрольные вопросы

1. Что изучает КРА?
2. Уравнение регрессии.
3. Планирование с использованием метода ПФП.
4. Как проверяется воспроизводимость опытов?
5. Как определяются коэффициенты уравнения регрессии?
6. Как определяется статистическая значимость коэффициентов уравнения регрессии?
7. Как проверить, адекватно ли полученное уравнение регрессии экспериментальным данным?
8. Как влияют скорость и подача при плоском шлифовании на высоту микронеровностей поверхности?

Практическая работа № 4 ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПО МЕТОДУ ГАУССА–ЗАЙДЕЛЯ

Цель работы: практическое освоение методики поисковой оптимизации при разработке состава легированной стали.

Основные положения

Главной целью большинства исследований является достижение наилучших показателей (при разработке рецептуры материала, технологии процесса и т. д.). Оптимизацией называется процесс нахождения наилучших значений целевой функции y , которая принимается за критерий оптимизации. Если критерий оптимизации y есть функция входных управляемых параметров x_1, x_2, \dots, x_n , т. е. $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, (где n – число факторов), то задача оптимизации сводится к отысканию таких значений факторов, при которых целевая функция y достигает экстремума (минимума или максимума). Решение может быть либо аналитическим (когда целевая функция y задана), либо экспериментальным.

В случае, когда целевая функция y неизвестна, используют экспериментальные методы поисковой оптимизации, основными из которых являются: метод Гаусса–Зайделя, метод градиента, метод крутого восхождения Бокса–Уилсона и симплексный метод. Каждый из методов включает в себя две процедуры: определение направления движения к экстремуму с помощью пробных опытов и «рабочее» движение в сторону экстремума.

Данная практическая работа посвящена освоению метода Гаусса–Зайделя. Этот метод предусматривает поочередное нахождение частных экстремумов целевой функции по каждому фактору x_i ($i = 1, 2, \dots, n$). При этом на каждом i -м этапе стабилизируют $n - 1$ факторов и варьируют только один i -й фактор. Графическая интерпретация метода дана на рис. 4.1 на примере двух факторов x_1 и x_2 . Функция отклика y изображена топографическим способом с помощью замкнутых линий постоянного уровня y ($y = \text{const}$). До начала исследований форма функции отклика, естественно, неизвестна, т. е. исследователь на момент планирования не видит этих линий. (Они обозначены на рис. 4.1, чтобы понять, как работает метод.) Путь движения отмечен точками M .

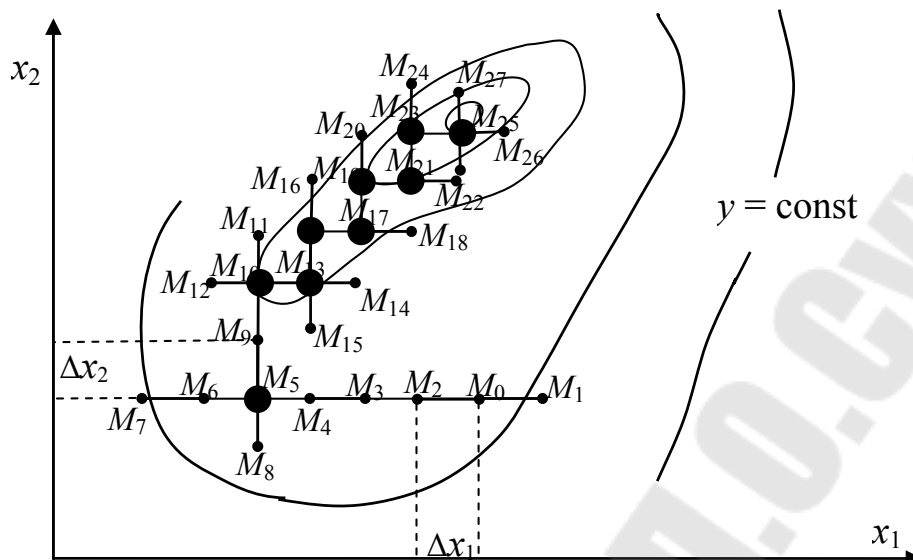


Рис. 4.1. Метод Гаусса–Зайделя

Достоинства метода Гаусса–Зайделя: простота и наглядность.

Недостатки: 1) долгий путь к главному экстремуму, особенно при большом числе факторов n ; 2) метод не дает информации о взаимодействиях факторов.

Порядок выполнения работы

1. Выбор условий и формулировка оптимизационной задачи

Согласно указанного преподавателем варианта выбрать из табл. 4.1 критерий оптимизации; факторы X_1 и X_2 , влияющие на целевую функцию; начальную точку исследования $M_0(x_{10}, x_{20})$ и интервалы варьирования по обоим факторам ΔX_1 и ΔX_2 .

2. Выбор методики экспериментального определения значений целевой функции

Согласно выбранному критерию оптимизации представить подробное описание методики экспериментального определения значений целевой функции, включая оборудование и основные формулы для расчета (если измерение косвенное). Обзор основных методик представлен в конспекте лекций данного курса, а также в учебном пособии «Методы исследования»¹ в главе 3 «Методы исследования материалов, деталей машин и их свойств».

¹Царенко, И. В. Методы исследования : учеб. пособие / И. В. Царенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007.

3. Поиск частного экстремума при движении по X_1 со стабилизацией X_2

Таблица 4.1

Условия задачи поисковой оптимизации

Вариант	Критерий оптимизации $y = f(x_1, x_2)$	x_1	x_2	$M_0(x_{10}; x_{20})$		Δx_i		Число шагов
				x_{10}	x_{20}	Δx_1	Δx_2	
1	$i_h = 5 \cdot 10^{-4}$ мм/мин	Sc	Ti	5	5	0,1	0,2	24
2	$i_V = 18 \cdot 10^{-5}$ мм ³ /мин	Y	Zr	10	5	0,3	0,1	7
3	$i_m = 3 \cdot 10^{-6}$ г/мин	La	Hf	13	6	0,2	0,2	18
4	$I_h = 7 \cdot 10^{-3}$ мм/м	Fr	Os	6	6	0,2	0,2	8
5	$I_m = 4 \cdot 10^{-5}$ г/м	V	Nd	7	7	0,3	0,2	11
6	$E_{и} = 3 \cdot 10^5$	Ba	Tc	8	8	0,4	0,3	6
7	$K = 1,8 \cdot 10^{-7}$	Hf	Ir	4	5	0,2	0,3	15
8	$D_{и} = 8,4$ мм	In	Ni	6	7	0,3	0,4	8
9	$\sigma_B = 920$ МПа	Bi	Po	7	8	0,2	0,3	22
10	$\tau = 390$ МПа	Cd	Y	8	9	0,3	0,4	10
11	$KC = 270$ Дж/см ²	Rh	Zr	9	9	0,4	0,4	25
12	$T_{пл} = 1860$ °С	Sm	Rb	8	6	0,4	0,3	16
13	$\alpha = 8,7 \cdot 10^{-4}$ К ⁻¹	Tc	Sc	8	5	0,4	0,2	23
14	$V_K = 5 \cdot 10^{-4}$ г/м ² · ч	Ta	Re	8	4	0,3	0,2	29
15	$I_m = 8 \cdot 10^{-5}$ г/м ²	Mn	Ta	4	4	0,1	0,2	33
16	$i_h = 8 \cdot 10^{-6}$ мм/мин	Cr	Li	10	8	0,5	0,3	17
17	$i_V = 5 \cdot 10^{-4}$ мм ³ /мин	Co	Zr	8	11	0,4	0,4	9
18	$i_m = 7 \cdot 10^{-5}$ г/мин	Ni	Y	10	10	0,4	0,6	12
19	$I_h = 5 \cdot 10^{-2}$ мм/м	Zn	Ra	11	11	0,5	0,4	5
20	$I_m = 3 \cdot 10^{-4}$ г/м	Mo	Cs	3	3	0,1	0,2	18
21	$E_{и} = 7 \cdot 10^6$	Nb	Rb	3	4	0,2	0,4	7
22	$K = 2,3 \cdot 10^{-8}$	Ta	Zr	3	7	0,1	0,1	14
23	$D_{и} = 7,1$ мм	Mg	Sc	12	12	0,4	0,5	13
24	$\sigma_B = 850$ МПа	Be	Mo	15	13	0,3	0,4	19
25	$\tau = 330$ МПа	Ra	Tc	14	12	0,5	0,3	27
26	$KC = 230$ Дж/см ²	Cu	Mn	13	13	0,4	0,5	20
27	$T_{пл} = 2750$ °С	W	Ac	13	11	0,1	0,2	31
28	$\alpha = 5,6 \cdot 10^{-4}$ К ⁻¹	V	Mg	14	10	0,4	0,2	28
29	$V_K = 7 \cdot 10^{-5}$ г/м ² · ч	Ti	Ba	15	10	0,5	0,3	26
30	$I_m = 3 \cdot 10^{-2}$ г/м ²	Li	Ta	14	14	0,4	0,5	21

Примечание: i_h – линейная скорость изнашивания; i_V – объемная скорость изнашивания; i_m – массовая скорость изнашивания; I_h – интенсивность изнашивания линейная; I_m – интенсивность изнашивания массовая, $E_{и}$ – износостойкость; K – коэффициент износа; $D_{и}$ – средний диаметр пятна износа; σ_B – предел прочности; τ – предел прочности при кручении; KC – ударная вязкость; $T_{пл}$ – температура плавления; α – коэффициент теплового расширения; V_K – скорость коррозии.

3.1. Определение координат пробных точек $M_1(x_{10} + \Delta x_1; x_{20})$ и $M_2(x_{10} - \Delta x_1; x_{20})$.

3.2. Определение $y(M_1)$ и $y(M_2)$ в результате проведения пробных опытов.

3.3. Определение направления движения в сторону оптимального, например, большего $y(M_i)$. Если $y(M_2) > y(M_1)$, то рабочее движение совершают на один шаг по направлению вектора M_0M_2 в точку M_3 .

3.4. Движение аналогичным образом продолжается до реализации условия $y(M_k) < y(M_{k-1})$, которое указывает на достижение частного экстремума в точке M_{k-1} . На рис. 4.1 это точка M_5 .

4. Поиск частного экстремума при движении по X_2 со стабилизацией X_1

Порядок проведения поиска тот же, что и для этапа 3. За новую базовую точку принимают $M_{k-1}(x_{10} \pm \Delta x_1(k-2); x_{20})$, а x_2 варьируют на Δx_2 . После достижения частного экстремума по фактору x_2 , точку нового экстремума принимают за новую базовую точку. На рис. 4.1 это M_{10} . Первый цикл продвижения к общему экстремуму закончен.

5. Выполнение необходимого количества циклов поиска

Все циклы выполняются по схеме, описанной в п. 3 и 4, т. е. путем достижения частных экстремумов по обоим факторам. Общий экстремум считается достигнутым, если при движении в любую сторону по всем n -факторным осям значения отклика y оказываются меньшими. На представленном на рис. 4.1 примере до достижения общего экстремума потребовалось пять циклов поиска и 27 шагов оптимизации.

6. Графическая интерпретация метода с указанием конкретных значений факторов и целевой функции

Представить графическую интерпретацию метода аналогично примеру на рис. 4.1 с указанием конкретных значений факторов и целевой функции.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Описание методики решения оптимизационных задач. Достоинства и недостатки метода Гаусса–Зайделя.
3. Условия оптимизационной задачи: критерий оптимизации; факторы X_1 и X_2 , влияющие на целевую функцию; начальную точку исследования $M_0(x_{10}, x_{20})$ и интервалы варьирования по обоим факторам ΔX_1 и ΔX_2 .

4. Формулировка оптимизационной задачи.
5. Методика экспериментального определения значений целевой функции.
6. Определение координат пробных точек M_i , значений целевой функции $y(M_i)$ для каждой точки, частных и общего экстремумов. Результаты представить по форме табл. 4.2.

Таблица 4.2

Данные движения к экстремуму

Номер точки	Координаты точек поиска M_i		$y(M_i)$	Частный/общий экстремум
	по фактору X_1	по фактору X_2		
0				
1				
...				
N				

7. Графическая интерпретация метода с указанием конкретных значений факторов и целевой функции.
8. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Оптимизация и критерии оптимизации. Определение и примеры.
2. Методика решения оптимизационных задач.
3. Экспериментальные методы поисковой оптимизации.
4. Метод Гаусса–Зайделя. Достоинства и недостатки метода.

Практическая работа № 5 ТЕХНОЛОГИЯ РАЗВИТИЯ ТВОРЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ АНАЛИЗА БИОГРАФИИ ТВОРЧЕСКОЙ ЛИЧНОСТИ

Цель работы: провести анализ биографии творческой личности с целью выявления способов развития творческого мышления

Основные положения

Пути развития творческого мышления можно выявить в результате анализа биографии творческой личности. Так психологами было установлена необходимость воспитания открытости к изменениям, открытости к обучению, беглости и гибкости мышления и т. д., которые способствуют развитию креативности. Изучение биографий творческих личностей крайне важно для формирования творческого мышления.

Порядок выполнения работы

1. Изучить биографию указанной преподавателем творческой личности (ученого, изобретателя).
2. Провести анализ биографии творческой личности.
3. Выявить способы развития творческого мышления исследуемой личности.

Содержание отчета

1. Анкетные данные личности: число, месяц, год рождения и смерти; место рождения и смерти; национальность; вероисповедание.
2. Влияние семьи на развитие творческой личности: предки, ближние родственники (отец, мать, братья, сестры), дальние родственники.
3. Влияние учителей и воспитателей на развитие творческой личности: место и время учебы, основные учителя, последователем какого учения являлся, любимые предметы, роль самообразования и т. д.
4. Влияние профессии на развитие творческой личности: профессии, время и место работы и т. д.

5. Влияние финансовых факторов на развитие творческой личности: финансовое положение семьи (наличие первоначальной финансовой независимости), источники доходов (работа, рента), наличие собственности, наличие финансовых проблем, принесли ли изобретения, открытия финансовую независимость (финансовое благополучие).

6. Влияние личной жизни на развитие творческой личности: наличие собственной семьи, жена/муж, дети, отношения в семье.

7. Влияние друзей и врагов на развитие творческой личности: друзья, враги; что о нем/ней говорили другие (молва, ученики); прозвище.

8. Влияние здоровья на развитие творческой личности: здоровье в период детства (при рождении), юности, зрелости, старости, болезни, особенности питания (вегетарианец, сыроед, любимая еда и т. д.), особенности распорядка дня (сова, жаворонок, время сна и т. д.), причина смерти.

9. Влияние особенностей биографии на развитие творческой личности: путешествия (когда, куда, зачем), отношения с обществом, государством, властью (включая судимости, изгнания и т. д.), удача и случай в биографии и их роль, и т. д.

10. Влияние особенностей характера на развитие творческой личности: основные, определяющие черты характера (трудолюбие, упорство и т. д.), таланты; любимые занятия (хобби); коммуникабельность, отношение к людям; отношение к природе; основные принципы; девиз жизни; соотношение труд/талант; привычки/странности; зависимости/пристрастия (карты, скачки, учеба); азартность; что больше всего ценил/любил.

11. Основной вклад в развитие общества, науки: количество письменных работ; перечислить основные работы; перечислить и описать основные изобретения и открытия; сформулировать основной вклад в развитие общества и науки; привести наиболее известные его/ее высказывания.

12. Выводы: что оказало основное влияние на развитие исследуемой личности; методы развития творческого мышления, применяемые исследуемой личностью.

Практическая работа № 6 ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Цель работы: провести анализ одной из последних инновационных разработок в машиностроении.

Основные положения

Инновация – созданные и практически использованные (доведенные до потребителя) новые или усовершенствованные виды продукции, технологий или услуг, а также организационные решения административного, производственного, коммерческого или иного характера, обеспечивающие экономический эффект (социальный, экологический или иной эффект).

Равнозначным понятию «инновация» является понятие «нововведение». Но иногда понятие «инновация» ошибочно отождествляют с понятием «новшество», что не одно и то же. Новшество – научное знание, обладающее новизной и существенными отличиями по сравнению с существующими знаниями; результат научных исследований, технических разработок, опытных работ, оформленных документально (открытие, изобретение, ноу-хау, техническая документация на новый или усовершенствованный продукт, стандарт и др.) или представленных в вещественном виде (макет, опытный или экспериментальный образец). Новшество превращается в инновацию лишь после того, как оно доводится до потребителя, находит практическое применение. Типичными примерами новшеств являются опытные образцы новой продукции, в ходе создания которых изучаются и совершенствуются свойства и технологии изготовления новой продукции, определяются возможности ее производства. С экономической точки зрения главной особенностью инноваций, отличающей их от новшеств, являются присущие им свойства товара, под которым понимается продукт труда, способный удовлетворять те или иные потребности и производимый для обмена путем купли-продажи. Основными свойствами товара выступают потребительская стоимость (совокупность полезных свойств) и стоимость (овеществленный в товаре труд и, как следствие, способность товара к обмену).

Разработке новшеств обычно предшествует разработка инновационных идей, представляющих совокупность знаний об основных свой-

ствах и принципах создания инновации (новых видов продукции или технологий), в том числе формулировка понятий, построение теорий, экспериментирование, классификация и обобщение полученных результатов, обработка и усвоение информации. Можно сказать, что инновационные идеи представляют собой прообразы новшеств, которые превращаются в новшества в результате материализации (например, создание образца изделия по его чертежам).

Новую продукцию и новые технологии рассматривают как два различных типа инноваций, именуемых соответственно продуктовыми и процессными инновациями. Продуктовая инновация связана с созданием и практическим использованием новых или усовершенствованных видов продукции. Процессная инновация связана с созданием и практическим использованием новых или усовершенствованных видов технологий (технологических процессов). Следует, однако, заметить, что термин «процессные инновации» более правильно относить не к новым технологиям вообще, а к новым технологическим процессам как одной из составляющих технологий, поскольку другая составляющая – новые технологические средства, т. е. оборудование, оснастка, инструмент фактически являются продуктовыми инновациями. С учетом сделанного замечания новые технологии следует именовать технологическими инновациями. Продуктовые инновации иначе принято называть инновационной продукцией. Аналогично технологические инновации иначе можно называть инновационными технологиями. Технологические инновации часто служат базой для создания продуктовых инноваций. Действительно, производство многих видов новой продукции просто невозможно без использования новых технологий.

Порядок выполнения работы

Работа выполняется в форме презентации в любой из презентационных программ (например, Power Point). Презентация должна включать следующие обязательные слайды:

1. Название инновационной разработки, автор обзора-анализа.
2. Краткие сведения об авторе/ах инновационной разработки.
3. История создания разработки.
4. Прототип разработки (предшествующая разработка, на смену которой пришла новая).
5. Достоинства разработки по сравнению с прототипом.

6. Недостатки разработки (слабые стороны).
7. Описание и принципиальная схема действия разработки.
8. Область применения разработки.
9. Перспективы развития разработки.

Перечисленные слайды являются необходимым минимумом. Расширение презентации производится студентом исходя из конкретного материала.

Лучшие из представленных работ рекомендуются к участию в ежегодной студенческой научно-технической конференции.

Содержание отчета

1. Презентация.
2. Реферат, содержащий полную информацию об инновационной разработке.
3. Источники полученной информации (литература).

Содержание

<i>Практическая работа № 1. Методика обработки результатов прямых измерений</i>	3
<i>Практическая работа № 2. Методика обработки результатов косвенных измерений</i>	11
<i>Практическая работа № 3. Исследование влияния режимов шлифования (V, S) на шероховатость поверхности деталей с помощью корреляционно-регрессионного анализа (КРА)</i>	20
<i>Практическая работа № 4. Оптимизация состава легированной стали по методу Гаусса–Зайделя</i>	30
<i>Практическая работа № 5. Технология развития творческого мышления на примере анализа биографии творческой личности</i>	35
<i>Практическая работа № 6. Инновационные разработки в машиностроении</i>	37

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Царенко Ирина Владимировна

**ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ,
ИЗОБРЕТАТЕЛЬСТВА И ИННОВАЦИОННОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

**Практикум
по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-36 01 01
«Технология машиностроения»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Редактор *Н. В. Гладкова*
Компьютерная верстка *М. В. Кравцова*

Подписано в печать 16.12.13.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,25.

Изд. № 16.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр Учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48