

Лабораторная работа №1. Статистическое моделирование

Цель работы: Освоение метода планирования экспериментов и разработка математической модели, адекватно описывающей процесс и позволяющей осуществлять управление производством.

1 Подготовка к выполнению работы

При планировании эксперимента исследователь должен:

- обеспечить высокую надежность и четкость интерпретации результатов экспериментальных исследований;
- составить последовательную логическую схему построения всего процесса исследования;
- максимально формализовать процесс разработки модели и сопоставления экспериментальных данных различных опытов одного и того же объекта исследований с целью широкого применения электронно-вычислительных средств.

Всем требованиям отвечают статистические методы планирования эксперимента. Статистические методы планирования активного эксперимента являются одним из эмпирических способов получения математического описания статистики сложных объектов исследования, то есть уравнения связи отклика объекта и независимых управляемых входных переменных (факторов).

При исследовании процессов резания многие зависимости традиционно представляют уравнениями степенного вида. Например, зависимость стойкости режущего инструмента от элементов режима резания часто выражают уравнением:

$$T = cV^{\alpha}S^{\beta}t^{\gamma} \quad (1)$$

где V - скорость резания, S – подача, t – глубина резания, c, α, β, γ – постоянные величины

Уравнение (1) в результате логарифмирования линеаризуется в:

$$\lg T = \lg c + \alpha \lg V + \beta \lg S + \gamma \lg t \quad (2)$$

Уравнение (2) можно выразить следующим образом:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (3)$$

где $y = \lg T$; x_1, x_2, x_3 -кодированные значения V, S, t .

Кодирование факторов проводят по следующей формула:

$$x_i = \frac{2(\lg \bar{x}_i - \lg x_{iB})}{(\lg x_{iB} - \lg x_{iH})} \quad (4)$$

где \bar{x}_i – натуральное значение (значение из исходных данных);
 x_{iB}, x_{iH} – натуральные значения верхнего и нижнего уровней соответственно.

Для оценки коэффициентов уравнения (3) удобно использовать результаты многофакторного эксперимента. При этом результаты опытов обычно представляют полиномом вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (5)$$

После определения коэффициентов уравнения (5) необходимо проверить гипотезу адекватности линейной части этих полиномов. Если гипотеза подтверждается, т. е. уравнение $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$ адекватно, то, подставляя в это уравнение значения x_1, x_2, x_3 определяемые соотношением (4), получим выражение (2). Если гипотеза адекватности уравнения не подтверждается, то необходимо проверить гипотезу адекватности уравнения (5). В случае, если уравнения (5) окажутся адекватными, можно будет предложить другую модель, характеризующую зависимость стойкости инструмента от исследуемых факторов.

2. Порядок выполнения работы

Исходные данные

№ Эксперимента	V, об/мин	Шаг S, мм	t, мм	Р _y , Н		
1	9	2	0,2	260	280	330
2	37	2	0,2	160	160	155
3	9	6	0,2	320	350	300
4	9	2	0,5	810	860	970
5	37	6	0,2	220	200	190
6	37	2	0,5	540	500	560
7	9	6	0,5	870	800	920
8	37	6	0,5	540	580	510

На первом этапе перенесем исходные данные в приложение от MS EXCEL, и добавим еще один столбец рассчитав среднее значение Р_y в каждом эксперименте.

Для определение среднего значения можно воспользоваться встроенной в Excel функцией СРЗНАЧ, для этого в результирующем столбце прописываем команду “=СРЗНАЧ(указываем диапазон ячеек, среднее значение которых необходимо определить)”

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Исходные данные								
	№ оп	n,об/мин	Шаг S,мм	t, мм	Рy,Н				
	1	9	2	0,2	260	280	330	=СРЗНАЧ(E3:G3)	
	2	37	2	0,2	160	160	155		
	3	9	6	0,2	320	350	300		
	4	9	2	0,5	810	860	970		
	5	37	6	0,2	220	200	190		
	6	37	2	0,5	540	500	560		
	7	9	6	0,5	870	800	920		
	8	37	6	0,5	540	580	510		

Проделав данную процедуру для каждой строки (эксперимента), получаем новый столбец со средним значениям выходного параметра.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Исходные данные							
2	№ оп	n,об/мин	Шаг S,мм	t, мм	Рy,Н			Среднее значение
3	1	9	2	0,2	260	280	330	290
4	2	37	2	0,2	160	160	155	158,33
5	3	9	6	0,2	320	350	300	323,33
6	4	9	2	0,5	810	860	970	880,00
7	5	37	6	0,2	220	200	190	203,33
8	6	37	2	0,5	540	500	560	533,33
9	7	9	6	0,5	870	800	920	863,33
10	8	37	6	0,5	540	580	510	543,33

Для линеаризации составим новую таблицу, куда необходимо записать верхние и нижние уровни каждого фактора V,S,t. В столбец верхний уровень записываем максимальное значение фактора, в нижний уровень минимальное значение.

	A	B	C	D	E	F	G	H	
1			Исходные данные						
2	№ оп	п,об/мин	Шаг S,мм	t, мм	Рy,Н			Среднее значение	
3	1	9	2	0,2	260	280	330	290	
4	2	37	2	0,2	160	160	155	158,33	
5	3	9	6	0,2	320	350	300	323,33	
6	4	9	2	0,5	810	860	970	880,00	
7	5	37	6	0,2	220	200	190	203,33	
8	6	37	2	0,5	540	500	560	533,33	
9	7	9	6	0,5	870	800	920	863,33	
10	8	37	6	0,5	540	580	510	543,33	
11									
12									
13		верхний уровень	нижний уровень						
14	V	37	9						
15	S	6	2						
16	T	0,5	0,2						
17									
18									
19									

Для построения модели и нахождения коэффициентов нужно заполнить таблицу (матрицу экспериментов), где в заголовках столбцов будут коэффициенты, а в строках эксперименты. Шапка данной таблицы будет иметь вид:

z0	z1	z2	z3	z1z2	z1z3	z2z3	z1z2z3	Yi сред
----	----	----	----	------	------	------	--------	---------

Как видим таблица состоит из трех частей : 1) коэффициенты z_0, z_1, z_2, z_3 – эти значения заполняются после кодирования исходных данных по формуле (4). Поля столбца коэффициент z_0 не кодируются, в его ячейки необходимо заполнить +1. 2) $z_1z_2, z_1z_3, z_2z_3, z_1z_2z_3$ -коэффициенты определяется умножением соответственных значений строки и столбца, т.е. для 1го эксперимента значение поля z_1z_2 будет произведением значений полей Z_1 и Z_2 . 3) Y_i сред – это константы полученные расчетом логарифма P_y сред.

Для упрощения расчетов в столбец под ячейкой Z_1 запишем формулу:

$$=2*(LOG(B3)-LOG(B14))/(LOG(B14)-LOG(C14))+1,$$

где В3- текущее натуральное значение таблицы, \$B\$14 -верхний уровень для фактора V (символ \$ фиксированная ссылка на необходимую ячейку), \$C\$14 -нижний уровень для фактора V. По аналогии заполняем столбцы Z2 и Z3. В ячейку под заголовком z1z2 заполняем выражение “=C20*D20” – это воспроизведение коэффициентов z1 и z2. По аналогии заполняем остальные столбцы и строки, кроме Y_i – в это столбец заполняем “=LOG(H3)”.

Так как в каждом эксперименте проводилось по 3 опыта, необходимо найти логарифмы каждого результата, добавим еще 3 столбца после Y_i сред: y1, y2, y3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Исходные данные													
2	№ оп	n,об/мин	Шаг S,мм	t, мм	P _y ,Н			Среднее значение						
3	1	9	2	0,2	260	280	330	290						
4	2	37	2	0,2	160	160	155	158,33						
5	3	9	6	0,2	320	350	300	323,33						
6	4	9	2	0,5	810	860	970	880,00						
7	5	37	6	0,2	220	200	190	203,33						
8	6	37	2	0,5	540	500	560	533,33						
9	7	9	6	0,5	870	800	920	863,33						
10	8	37	6	0,5	540	580	510	543,33						
11														
12														
13		верхний уровень	нижний уровень											
14	V	37	9											
15	S	6	2											
16	T	0,5	0,2											
17														
18														
19		Z0	Z1	Z2	Z3	Z1Z2	Z1Z3	Z2Z3	Z1Z2Z3	Y _i сред	y1	y2	y3	
20	1	1	-1	-1	-1	0	1	1	-1	2,462398	2,4150	2,4472	2,5185	
21	2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	2,199572	2,2041	2,2041	2,1903	
22	3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	2,509650	2,5051	2,5441	2,4771	
23	4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	2,944483	2,9085	2,9345	2,9868	
24	5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	2,308209	2,3424	2,3010	2,2788	
25	6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	2,726999	2,7324	2,6990	2,7482	
26	7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	2,936179	2,9395	2,9031	2,9638	
27	8	1	1	1	1	1	1	1	1	2,735066	2,7324	2,7634	2,7076	
28														

Таким образом, мы сформировали таблицу (матрицу экспериментов), по которой мы рассчитаем искомые коэффициенты. Вычисляем коэффициенты уравнения регрессии по формулам:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{i \text{ сред}} \\
 b_i &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ji} Y_{j \text{ сред}} \\
 b_{r,p} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{jr} x_{jp} Y_{j \text{ сред}}
 \end{aligned} \tag{6}$$

и т.д., если учитываются другие взаимодействия.

Создадим новую таблицу, в которую запишем вычисляемые коэффициенты:

b0	b1	b2	b3	b12	b13	b23	b123
----	----	----	----	-----	-----	-----	------

Для упрощения вычислений, воспользуемся функцией Excel вычислений суммы воспроизведений массива чисел и запишем в столбец под b0 следующее выражение:

“=СУММПРОИЗВ(C20:C27*\$J\$20:\$J\$27)/8”

	Z0	Z1	Z2	Z3	Z1Z2	Z1Z3	Z2Z3	Z1Z2Z3	Yi сред	y1	y2	y3
1	1	-1	-1	-1	0	1	1	-1	2,462398	2,4150	2,4472	2,5185
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	2,199572	2,2041	2,2041	2,1903
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	2,509650	2,5051	2,5441	2,4771
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	2,944483	2,9085	2,9345	2,9868
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	2,308209	2,3424	2,3010	2,2788
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	2,726999	2,7324	2,6990	2,7482
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	2,936179	2,9395	2,9031	2,9638
8	1	1	1	1	1	1	1	1	2,735066	2,7324	2,7634	2,7076
	b0	b1	b2	b3	b12	b13	b23	b123				
	=СУММПРОИЗВ(B20:B27*\$J\$20:\$J\$27)/8	#ЗНАЧ!	#ЗНАЧ!	#ЗНАЧ!	#ЗНАЧ!	#ЗНАЧ!	#ЗНАЧ!	#ЗНАЧ!				
	СУММПРОИЗВ(массив1; [массив2]; [массив3]; ...)											

По аналогии сделаем со следующими коэффициентами и найдем их значения.

b0	b1	b2	b3	b12	b13	b23	b123
2,60	-0,11	0,02	0,23	-0,30	0,01	-0,02	-0,01

Полученные коэффициенты необходимо проверить на значимость. Это можно сделать с помощью критерия Стьюдента:

если $|b| > t_{кр} * S_{коэф}$, коэффициент b значимый; если наоборот, то b незначим и его полагают равным нулю в уравнении регрессии.

Критическую точку $t_{кр}$ находят из таблиц распределения Стьюдента по числу степеней свободы $f_x = (m - 1)$ и с заданным уровнем значимости α для случая двусторонней критической области.

m – количество опытов к одному эксперименте, в нашем случае =3, а число степеней свободы $f_x = 3-1=2$.

Среднее квадратическое отклонение коэффициентов $S_{коэф}$ зависит от дисперсии воспроизводимости результатов по всем проведенным опытам $S^2_{\{y\}}$ и вычисляется по формуле:

$$S_{\text{коэф.}} = \sqrt{\frac{S_{\{y\}}^2}{n \cdot m}} \quad (7)$$

Дисперсия воспроизводимости $S_{\{y\}}^2$ характеризует ошибку всего эксперимента. В случае равномерного дублирования опытов (т.е. при одинаковом числе наблюдений в каждом эксперименте) для расчета $S_{\{y\}}^2$ используют формулу:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{n(m-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (y_{ji} - y_{j \text{ сред}})^2 \quad (8)$$

где n – число экспериментов (число строк в матрице ПФЭ);

m – число опытов (наблюдений) в каждом эксперименте;

y_{ji} – результат отдельного i -го наблюдения в j -ом эксперименте;

$y_{j \text{ сред}}$ – среднее выборочное значение наблюдений для j -ого эксперимента, которое определяется по формуле.

Для определения дисперсии воспроизводимости добавим еще один столбец к нашей таблице “Сумма $(Y_{ji} - Y_{j \text{ сред}})^2$ ” и запишем следующую формулу для его расчёта:

$$“=(J20-K20)^2 + (J20-L20)^2 + (J20-M20)^2”$$

223	Yi сред	y1	y2	y3	Сумма(Yji-Yj сред)2
-1	2,462398	2,4150	2,4472	2,5185	=(J20-K20)^2 + (J20-L20)^2 + (J20-M20)^2
1	2,199572	2,2041	2,2041	2,1903	
1	2,500550	2,5051	2,5441	2,4771	

По аналогии сделаем для остальных строк таблицы

Суммируя полученные значения в столбце N строки 20 по 27 и поделив на $(2 \cdot 8) = 16$, получим значения дисперсии воспроизводимости $S_{\{y\}}^2 = 0,01125$.

Определим среднее квадратическое отклонение коэффициентов по формула (8) записываем в ячейку N32 “=КОРЕНЬ(N29/24)” и получаем $S_{\text{коэф}} = 0,006845$.

Из таблиц распределения Стьюдента по числу степеней свободы $n \cdot (m-1) = 8 \cdot 2 = 16$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ находим $t_{\text{кр.}} = 2,12$.

Следовательно $t_{\text{кр}} \cdot S_{\text{коэф}} = 2,12 \cdot 0,00684 = 0,0145$. Запишем полученное значение в поле N37

Проверим значимость коэффициентов уравнения регрессии. Для этого во второй строке таблицы коэффициентов запишем условную функцию вида:

=ЕСЛИ(ABS(C\$30)>(\$N\$37);"Значима";"не значима")

Где C\$30 – наш определяемый коэффициент, \$N\$37 - $t_{кр} * S_{коэф.}$

Проделав данную операцию, увидели что все коэффициенты, кроме b_{13} и b_{123} , значимы для нашей модели.

b0	b1	b2	b3	b12	b13	b23	b123
2,60	-0,11	0,02	0,23	-0,01	0,01	-0,02	-0,01
Значима	Значима	Значима	Значима	Не значима	не значима	Значима	не значима

Полагая

$b_{12}=b_{13}=b_{123}= 0$, получаем уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 2.6 - 0.11x_1 + 0.02x_2 + 0.23x_3 - 0.02x_2x_3 \quad (9)$$

Проверим полученное уравнение (9) на адекватность по критерию Фишера. Проверка на адекватность полученного уравнения регрессии со значимыми коэффициентами осуществляется с помощью критерия Фишера: если $F_{расч} < F_{табл.}$, то уравнение адекватно, в противном случае – неадекватно.

$$F_{расч} = \frac{S_{ост}^2}{S_{\{y\}}^2} \quad (10)$$

Так как дисперсия воспроизводимости найдена в предыдущем пункте, то для определения расчетного значения критерия $F_{расч.}$ необходимо вычислить остаточную дисперсию $S_{ост}^2$.

Для этого найдем значения изучаемого параметра по полученному уравнению регрессии \tilde{y}_j ($j=1, \dots, 8$), подставляя +1 или -1 вместо x_i в соответствии с номером j эксперимента и создадим новую таблицу, где будут учтены только значимые коэффициенты

	Z0	Z1	Z2	Z3	Z2Z3		Yi сред	Ymi
1	1	1	-1	-1	-1	1	2,462398	
2	1	1	1	-1	-1	1	2,199572	
3	1	1	-1	1	-1	-1	2,509650	
4	1	1	-1	-1	1	-1	2,944483	
5	1	1	1	1	-1	-1	2,308209	
6	1	1	1	-1	1	-1	2,726999	
7	1	1	-1	1	1	1	2,936179	
8	1	1	1	1	1	1	2,735066	

Расчетные значения заполним в столбец Ymi. Для упрощения расчетов запишем в ячейке формулу:

$$=C\$30+D\$30*C35+E\$30*D35+F\$30*E35+G\$30*F35+G35*I\$30$$

b0	b1	b2	b3	b12	b13	b23	b123
2,60	-0,11	0,02	0,23	0,01	0,01	-0,02	-0,01
Значима	Значима	Значима	Значима	не значим	не значим	Значима	не значима

Z0	Z1	Z2	Z3	Z1Z2	Z2Z3	Yi сред	Ymi
1	1	-1	-1	-1	1	2,462398	=C\$30+D\$30*C35+E\$30*D35+F\$30*E35+G\$30*F35+G35*I\$30
2	1	1	-1	-1	1	2,199572	2,199572

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{m}{n - r} \sum_{i=1}^n (y_{mi} - y_{i \text{ сред}})^2$$

где n – число экспериментов;

m – число опытов в каждом эксперименте;

r – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии;

y_{mi} – значение изучаемого параметра, вычисленное по уравнению регрессии со значимыми коэффициентами для j-ого эксперимента;

y_{i сред} – среднее выборочное значение наблюдений для j-ого эксперимента.

Для расчета остаточной дисперсии воспользуемся функцией в Excel сумма квадратов разности “=СУММКВРАЗН(I35:I42;H35:H42)” и умножим полученное значение на m/(n-r)=3/(8-6)=1.5

$$S_{\text{ост}}^2 = 0.00127$$

Табличное значение критерия F_{табл.} находят из таблиц критических точек распределения Фишера по заданному уровню значимости α и по соответствующим степеням свободы k₁= (n – r) и k₂= n(m - 1). Степень свободы k₁ соответствует степени свободы числителя формулы (10) – остаточной дисперсии S²_{ост.}, а k₂ – степень свободы

знаменателя формулы (10) – дисперсии воспроизводимости $S^2_{\{y\}}$.

Таким образом $F_{\text{расч}} = 1.129$

Табличное значение критерия $F_{\text{табл.}}$ находим из таблиц критических точек распределения Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ по соответствующим степеням свободы $k_1 = n - r = 8 - 5 = 3$ и $k_2 = n(m - 1) = 8 \cdot 2 = 16$.

$$F_{\text{табл.}} = 3,2$$

Так как $F_{\text{расч.}} = 1.129 < F_{\text{табл.}} = 3.2$, то уравнение регрессии (9) *адекватно*.

Следующим этапом рассчитываем коэффициенты степенной модели по формуле:

$$C = 10^d$$

$$d = \sum_{j=0}^p b_j - 2 \sum_{i=1}^p \frac{b_i \lg X_{iB}}{\lg X_{iB} - \lg X_{iH}}$$

Где p – количество значимых коэффициентов

$$\alpha_i = \frac{2b_i}{\lg X_{iB} - \lg X_{iH}}$$

Рассчитаем коэффициент d

$$= C30 + D30 + E30 + F30 - 2 * (D30 * \text{LOG}(B14) / (\text{LOG}(B14) - \text{LOG}(C14))) + E30 * \text{LOG}(B15) / (\text{LOG}(B15) - \text{LOG}(C15)) + F30 * \text{LOG}(B16) / (\text{LOG}(B16) - \text{LOG}(C16)))$$

Получаем что $d = 3.60$, тогда константа $C = 10^{3.60} = 3957.17$

Коэффициент для параметра скорости V $\alpha = D30 * 2 / (\text{LOG}(B14) - \text{LOG}(C14)) = -0.3595$

Коэффициент для параметра шага S $\beta = E30 * 2 / (\text{LOG}(B15) - \text{LOG}(C15)) = 0.081558$

Коэффициент для параметра подачи $\gamma = F30 * 2 / (\text{LOG}(B16) - \text{LOG}(C16)) = 1.170338$

По результатам проведенных расчетов формула (1) принимает окончательный степенной вид:

$$P_y = 3957,17 V^{-0,3595} S^{0,081558} t^{1,170338}$$

По уравнению видно, что наиболее сильное влияние оказывает фактор t – величина подачи, так как он имеет наибольший по абсолютной величине коэффициент. После него по силе влияния на отклик (P_y) идет фактор S шаг.

Так как коэффициенты степеней S и t положительны, то с увеличением этих факторов увеличивается отклик, т.е. увеличивается P_y . Коэффициенты при V отрицательны, это означает, что с уменьшением фактора V значение отклика будет возрастать, а с увеличением – убывать.

Задания

- 1) Проверить однородность дисперсий параллельных опытов. Определить коэффициенты уравнения регрессии (степенная модель) по заданной матрице планирования эксперимента.
- 2) Проверить значимость коэффициентов уравнения регрессии.
- 3) Проверить адекватность полученной модели.
- 4) По результатам моделирования (пп. 1-3) сделать выводы о характере влияния факторов на исследуемый параметр и о степени пригодности и возможной области применения полученной модели.

1 вариант

№ оп	n,об/мин	Шаг S,mm	t, мм	Sm, мкм	
1	14,1	2	0,2	55	84
2	56,5	2	0,2	65	91
3	14,1	6	0,2	205	280
4	14,1	2	0,5	14	27
5	56,5	6	0,2	218	292
6	56,5	2	0,5	19	32
7	14,1	6	0,5	87	143
8	56,5	6	0,5	95	155

2 вариант

№ оп	n,об/мин	Шаг S,мм	t, мм	Стойкость T, мин	
1	15,7	2	0,2	74	95
2	61,5	2	0,2	16	17
3	15,7	6	0,2	68	89
4	15,7	2	0,5	38	60
5	61,5	6	0,2	4	8
6	61,5	2	0,5	0,8	2
7	15,7	6	0,5	12	28
8	61,5	6	0,5	2,1	2,3

3 вариант

№ оп	n,об/мин	Шаг S,мм	t, мм	Стойкость T, мин	
1	14,8	2	0,2	191	196
2	59,8	2	0,2	2	5
3	14,8	5	0,2	114	137
4	14,8	2	0,5	88	96
5	59,8	5	0,2	3	2
6	59,8	2	0,5	2	4
7	14,8	5	0,5	56	66
8	59,8	5	0,5	0,5	1,5

4 вариант

№ оп	n,об/мин	Шаг S,мм	t, мм	Ra, мкм		
1	31,5	2	42	12	17	22
2	125	2	0,2	11	15	21
3	31,5	6	0,2	21	28	34
4	31,5	2	0,5	35	40	44
5	125	6	0,2	27	23	18
6	125	2	0,5	33	38	42
7	31,5	6	0,5	48	49	56
8	125	6	0,5	36	41	52

5 вариант

№ оп	n,об/мин	Шаг S,мм	t, мм	Pz, Н		
1	9	2	0,2	260	280	330
2	37	2	0,2	160	160	155
3	9	6	0,2	320	350	300
4	9	2	0,5	810	860	770
5	37	6	0,2	220	200	190
6	37	2	0,5	540	500	560

7	9	6	0,5	870	900	920
8	37	6	0,5	540	580	510

6 вариант

№ оп	n,об/мин	Шаг S,мм	t, мм	Стойкость Т, мин	
1	15,1	2	0,2	134	170
2	61,5	2	0,2	10	18
3	15,1	6	0,2	32	40
4	15,1	2	0,5	44	54
5	61,5	6	0,2	4	8
6	61,5	2	0,5	3	5
7	15,1	6	0,5	24	34
8	61,5	6	0,5	2	1

7 вариант

№ оп	n,об/мин	Шаг S,мм	t, мм	Ra, мкм	
1	14,1	2	0,2	2,4	2,5
2	56,5	2	0,2	2	2,1
3	14,1	6	0,2	2,4	2,7
4	14,1	2	0,5	4,7	4,7
5	56,5	6	0,2	2	2,3
6	56,5	2	0,5	4	4,2
7	14,1	6	0,5	4,4	5
8	56,5	6	0,5	4,1	4,5

8 вариант

№ оп	n,об/мин	Шаг S,мм	t, мм	Стойкость Т, мин	
1	14,8	2	0,2	187	198
2	59,8	2	0,2	19	23
3	14,8	6	0,2	57	69
4	14,8	2	0,5	95	116
5	59,8	6	0,2	5	7
6	59,8	2	0,5	9	13
7	14,8	6	0,5	40	52
8	59,8	6	0,5	2	4