

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра технической эксплуатации автомобилей

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе

**«Параметрическая оптимизация режимов резания с использованием
табличного процессора Excel» по дисциплинам «Математическое
моделирование и САПР процессов резания, станков и инструментов»,
«САПР технологических процессов» для студентов специальности Т.03.01
«Технология, оборудование и автоматизация машиностроения»**

Брест 2000

УДК 621.7/9+681.3

Методические указания к лабораторной работе «**Параметрическая оптимизация режимов резания с использованием табличного процессора Excel**» по дисциплинам «Математическое моделирование и САПР процессов резания, станков и инструментов», «САПР технологических процессов» для студентов специальности Т.03.01 «Технология, оборудование и автоматизация машиностроения» содержат руководство для выполнения лабораторной работы и могут быть использованы при выполнении курсового проекта по «Технологии машиностроения» и дипломного проекта.

Составители: С.В. Монтик, доцент, к.т.н.
Я.А. Акулич, старший преподаватель

Рецензент: В.Н. Павлюк, зам. начальника машиностроительного комплекса
Брестского электролампового завода

© Брестский государственный технический университет 2001 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Тема: Параметрическая оптимизация режимов резания с использованием табличного процессора Excel

Цель: 1. Изучить методику параметрической оптимизации режимов резания

2. Создать в табличном процессоре Excel модель для оптимизации режимов резания

1. Оптимизация технологического процесса

Наличие нескольких вариантов технологического процесса приводит к задаче выбора наилучшего варианта. Таковым должен быть вариант технологического процесса, обеспечивающий выполнение в конкретных производственных условиях всех требований чертежа детали и дающий наилучшее значение выходных показателей. Неизменно возрастает значимость учета многовариантности при автоматизированном проектировании, т. к. с помощью ЭВМ очень сильно ослабляется роль таких факторов, как интуиция и опыт технолога. ЭВМ способна проанализировать значительно большее число вариантов и показателей технологического процесса. В силу этих особенностей ЭВМ оптимизационный подход является основным направлением совершенствованием методов автоматизированного проектирования.

Технологический процесс называют оптимальным, если он обеспечивает, во-первых, выполнение системы ограничений, отражающих условия протекания процесса и требования, предъявляемые к нему, и во-вторых, обеспечивает экстремум (минимум или максимум) критерия оптимальности. Наиболее часто употребляются следующие **критерии оптимальности**:

- максимум стойкости режущего инструмента,
- минимум штучного времени,
- максимум производительности (процесса, операции).

В последнее время все большее распространение получают интегральные критерии оптимальности, учитывающие весь комплекс затрат на организацию технологического процесса. Эти критерии являются экономическими по своей сути. Одним из простейших критериев этой группы является **технологическая себестоимость**. Этот критерий учитывает суммарный эффект от таких

противоречивых в подавляющем большинстве случаев факторов, как производительность процесса и себестоимость обработки. Другим наиболее полным критерием экономической эффективности технологического процесса являются *приведенные затраты*:

$$Z = C_{II} \Gamma + E_H K,$$

где E_H — нормативный коэффициент окупаемости капиталовложений; K — капиталовложения (первоначальные затраты); C_n — полная себестоимость единицы продукции (детали); Γ — годовой выпуск изделий (программа). Полная себестоимость детали может быть представлена в виде суммы

$$C_d = C_p + C_m,$$

где C_p и C_m — части полной себестоимости, зависящие соответственно от режима обработки и от материалоемкости детали.

Задача оптимизации технологического процесса предусматривает наличие трех основных элементов:

- математической модели процесса,
- функции цели (критерия оптимальности),
- метода оптимизации (оптимизационного алгоритма).

Для решения задачи оптимизации необходимо обе ее составные части представить в математической форме. Критерий оптимальности выражается как функция от оптимизируемых параметров и прочих характеристик процесса. Эту функцию часто называют *функцией цели*.

Оптимизируемые параметры — это параметры процесса, для которых в результате решения задачи должны быть найдены оптимальные значения. **Ограничения** могут также быть описаны функциями оптимизационных параметров, но чаще они имеют вид неравенства. **Система ограничений**, накладываемых на технологический процесс, описывает следующие группы:

- по производительности технологического процесса,
- по качеству продукции (точность исполнения размеров и формы, микрогеометрия поверхности, физико-механические свойства и т. д.);
- по технологическим возможностям оборудования, инструмента, приспособлений;
- по организационно-техническим возможностям производства.

Оптимизировать технологический процесс значит, во-первых, сформировать оптимальным образом сам набор технологических факторов, т. е. число и виды операций, а во-вторых, определить оптимальное значение каждого технологического фактора. Различают два вида оптимизации технологических процессов: структурную и параметрическую. **Структурная оптимизация** — это выбор оптимальной структуры технологического процесса, т. е. технологического маршрута, вида заготовки, типа оборудования, инструмента и т. д. **Параметрическая оптимизация** заключается в расчете оптимальных технологических параметров — допусков на межоперационные размеры, припусков, периодов стойкости, режимов резания и т. д.

Классической задачей параметрической оптимизации является расчет оптимальных режимов резания.

2. Параметрическая оптимизация режимов резания

При параметрической оптимизации решается обычно одно из следующих технико-экономических задач выбора параметров режима резания, обеспечивающих: 1) минимум затрат, связанных с процессом обработки (характерна для условий обработки на универсальных станках в серийном производстве); 2) максимум производительности (характерна для лимитирующих позиций станочных систем); 3) минимум затрат при заданной производительности (характерна для условий обработки на станках и автоматических линиях в массовом производстве). В основе решения всех описанных оптимизационных задач лежит модель процесса резания, которая отражает зависимость стойкости режущего инструмента от параметров режима обработки. В качестве примера параметрической оптимизации режимов резания рассмотрим следующую задачу.

Задание:

Определить оптимальные режимы резания (частоту n , подачу S) для чистовой токарной обработки по критерию максимальной производительности (минимуму основного времени T_o).

Для нахождения оптимальных режимов резания необходимо создать модель оптимизации процесса резания.

Математическая модель при оптимизации режимов резания

1. Оптимизируемые параметры

n -частота вращения шпинделя, мин⁻¹

S -продольная подача, мм/об

2. Целевая функция (критерий оптимальности)

Минимум основного времени T_o

$$\min T_o = L_{px} / (n \cdot S),$$

где L_{px} – длина рабочего хода. Так как при оптимизации длина рабочего хода не изменяется, то более удобно использовать следующую целевую функцию

$$\max F = \max n \cdot S$$

Ограничения

1) По стойкости режущего инструмента. При обработке стойкость режущего инструмента не должна быть меньше нормативной стойкости T_H . Скорость резания V зависит от стойкости режущего инструмента:

$$v = \frac{C_v K_v}{T_H^m t^{x_v} S^{y_v}},$$

где t -глубина резания, мм; T_H - нормативная стойкость режущего инструмента, мин. Остальные величины - коэффициенты для расчета скорости резания: C_v – эмпирический параметр, постоянный для группы обрабатываемых материалов; K_v – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и материала инструмента, а также других условий резания. Скорость резания связана с частотой вращения заготовки следующим выражением

$$v = \frac{\pi D n}{1000},$$

где D -диаметр обработки, мм.

Исходя из этого, после преобразований получим следующее выражение

$$n \cdot S^{y_v} \leq W_T$$
$$W_T = \frac{1000 \cdot C_v \cdot K_v}{\pi \cdot T_H^m \cdot t^{x_v} \cdot D},$$

2) По шероховатости обработанной поверхности, которая при точении определяется в основном подачей. Исходя из условия, что подача S на операции не должна превышать предельную подачу, получим ограничения по шероховатости

$$S \leq \frac{C_H R_z^y r^u}{t^v \varphi^z \varphi_1^z},$$

где C_H – коэффициент, характеризующий нормативные условия резания, r – радиус при вершине резца, R_z – шероховатость поверхности, φ , φ_1 – соответственно главный и вспомогательный углы в плане.

3) По точности обработки. Ограничениями режимов резания по требуемой точности являются упругие деформации элементов технологической системы под действием сил резания. В общем случае модель ограничения по упругой деформации имеет вид

$$\Delta_{доп} = \frac{P_y}{j},$$

где $\Delta_{доп}$ – допустимая упругая деформация по оси Y , j – жесткость технологической системы, P_y – сила резания, которая определяется по известной из теории резания формуле (для точения и растачивания):

$$P_y = 10 C_p t^x P S^y P_v^n P K_p.$$

4) По жесткости инструмента, т.к. из-за прогиба резца под действием сил резания снижается точность обработки.

5) Кинематические ограничения, обусловленные техническими возможностями станка:

- по частоте вращения шпинделя

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$$

- по подаче суппорта

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max}$$

6) По мощности привода главного движения. Для осуществления процесса резания необходимо выполнение условия

$$N_{эф} \leq N_{дв} \eta,$$

где $N_{эф} = P_z v$ – эффективная мощность резания, P_z , V – сила и скорость резания, $N_{дв}$ – мощность двигателя, η – КПД привода. После преобразований получим следующее выражение для ограничения по мощности привода

$$n^{n_p+1} \cdot S^{y_p} \leq W_N$$

$$W_N = \frac{6000 \cdot 10^{3(n_p+1)} \cdot N_{\partial v} \cdot \eta}{C_p \cdot K_p \cdot t^{x_p} \cdot (\pi D)^{n_p+1}}$$

где КПД привода $\eta=0,7-0,8$; остальные величины – коэффициенты для расчета силы резания

7) По прочности механизма подачи станка. Для продольного точения необходимо, чтобы сила резания P_x не превышала значений, предельных по прочности механизма привода подачи станка.

8) По прочности инструмента (пластины твердого сплава)

Для упрощения модели ограничения 2, 3, 4, 7, 8 при выполнении оптимизации на ЭВМ не учитываются.

Целевая функция и система ограничений являются нелинейными. Для решения такой задачи необходимо применять методы нелинейного программирования. Однако вид целевой функции и ограничений позволяет существенно упростить метод решения. В логарифмических координатах целевая функция и ограничения становятся линейными:

- целевая функция

$$F_1 = \ln F = \alpha + \beta \rightarrow \max;$$

где $\alpha = \ln n$; $\beta = \ln S$.

- ограничения

$$\alpha + y_v \beta \leq \ln W_T,$$

$$(n_p + 1)\alpha + y_p \beta \leq \ln W_N,$$

$$\ln n_{\min} \leq \alpha \leq \ln n_{\max},$$

$$\ln S_{\min} \leq \beta \leq \ln S_{\max},$$

и т. д.

После такого преобразования система ограничений вместе с целевой функцией представляет собой формулировку задачи линейного программирования, решение которой значительно проще. Оптимальные режимы резания обычно находятся на ЭВМ численными методами, что будет рассмотрено в следующем пункте.

3. Порядок выполнения работы

1. Изучите содержание пунктов 1 и 2. Запустите **Excel**. Создайте таблицу с исходными данными: верхняя строка - обозначение параметров, следующая строка - значение параметра (см. приложение А – Пример расчета). Варианты заданий с исходными данными приведены в приложении Б.

2. Создайте модель для оптимизации режимов резания. Для этого в одном столбце задайте оптимизируемые параметры, целевую функцию, ограничения по стойкости, мощности, частоте и подаче (см. таблицу 1). Ячейкам во 2 столбце присвойте имена (команда **Вставка/Имя/Присвоить**), имена указаны в таблице 1.

Таблица 1

1 столбец	2 столбец
Оптимизируемые параметры	
$n=$	[значение в пределах n_{\min} до n_{\max}], имя ячейки - <i>n</i>
$S=$	[значение в пределах S_{\min} до S_{\max}], имя ячейки - <i>S</i>
Ограничения	
$n_{\min}=$	[значение n_{\min}], имя ячейки - <i>n_min</i>
$n_{\max}=$	[значение n_{\max}], имя ячейки - <i>n_max</i>
$S_{\min}=$	[значение S_{\min}], имя ячейки - <i>S_min</i>
$S_{\max}=$	[значение S_{\max}], имя ячейки - <i>S_max</i>
$W_T=$	[формула (см. п. 2)], имя ячейки - <i>W_T</i>
$W_N=$	[формула (см. п. 2)], имя ячейки - <i>W_N</i>
$nS^{Yv}=$	[формула (см. п. 2)], имя ячейки - <i>nSV</i>
$n^{(np+1)}S^{Yp}=$	[формула (см. п. 2)], имя ячейки - <i>nSP</i>
Целевая функция	

$n \cdot S =$	[формула (см. п. 2)], имя ячейки - maxF
---------------	--

3. Оптимизируйте модель.

Для этого выделите ячейку со значением целевой функцией (целевая ячейка). Выберите команду **Сервис/Поиск решения**. При этом появится диалоговое окно **Поиск решения** (см. рисунок 1)

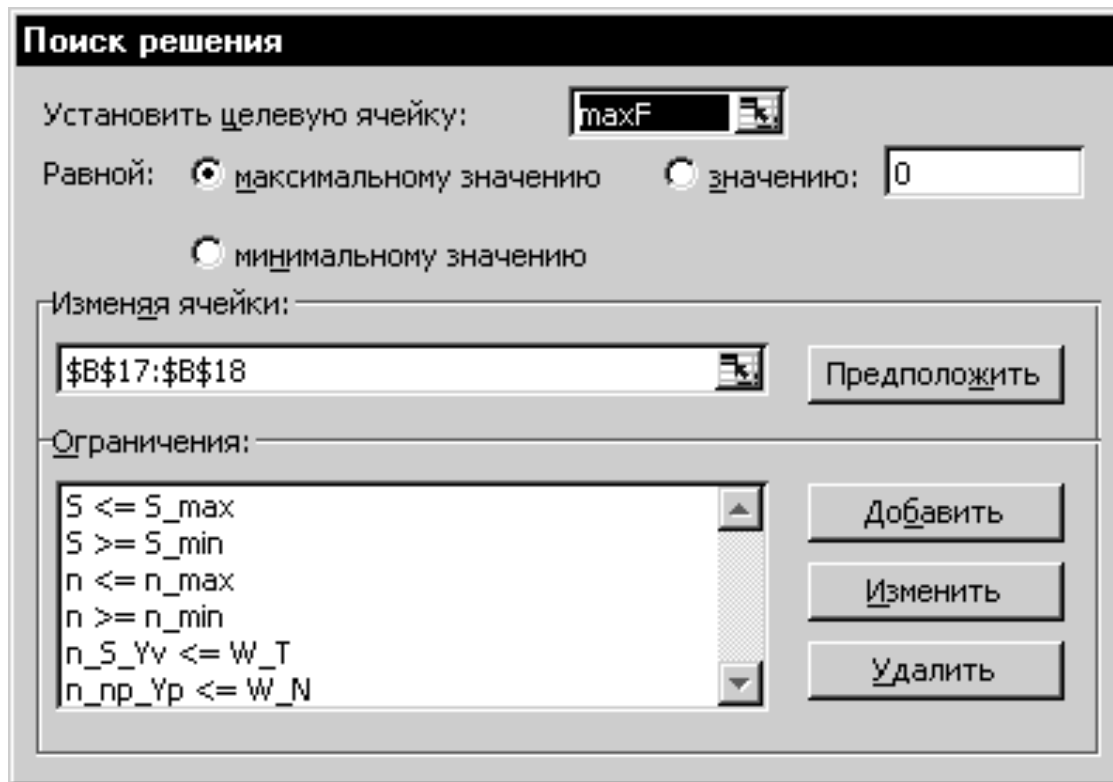


Рисунок 1

В диалоговом окне нужно задать следующие параметры:

- в поле **Целевая ячейка** будет представлена ссылка на выделенную ячейку, т. е. ячейку со значением целевой функцией;
- в группе **Равной** установите переключатель в положение **максимальному значению**;
- в поле **Изменяя ячейки** укажите ссылки на изменяемые ячейки, т. е. на ячейки со значениями оптимизируемых параметров n и S ;
- для ввода ограничений нажмите кнопку **Добавить**; в открывшемся диалоговом окне (см. рисунок 2) нужно будет указать ссылки на значения оптимизируемых параметров и ограничения (см. п. 2 и рисунок 1);

- после ввода ограничений нажмите кнопку **Выполнить**, затем в диалоговом окне **Результаты поиска решения** (см. рисунок 3) выберите **тип отчета** – **Результаты** и нажмите **ОК**.

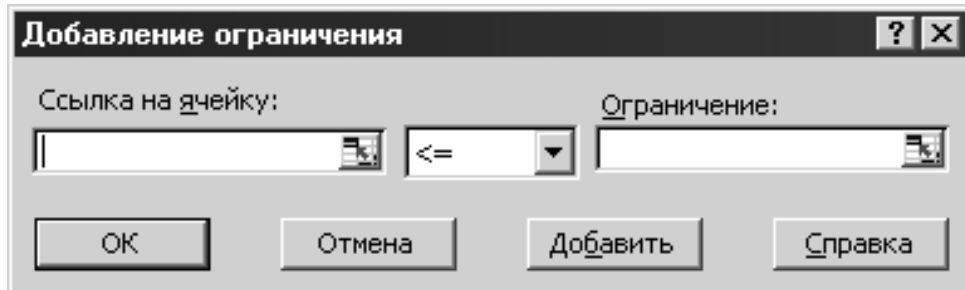


Рисунок 2

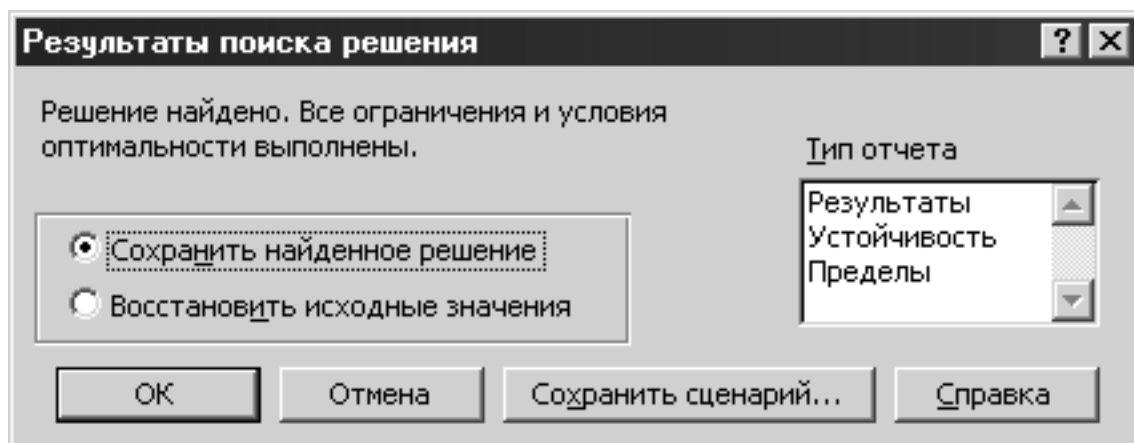


Рисунок 3

Пример расчета приведен в приложении А.

4. Создайте график, который определяет область допускаемых значений режимов резания. График строится в координатных осях : $S, \text{мм/об} - n, \text{мин}^{-1}$.

Область допускаемых значений ограничена графиками: $n = n_{\min}$, $n = n_{\max}$

(ограничения по кинематическим возможностям станка); $n_1 = \frac{W_T}{S^{y_v}}$

(ограничение по стойкости режущего инструмента), $n_2 = n_p^{+1} \sqrt{\frac{W_N}{S^{y_p}}}$

(ограничение по мощности привода главного движения). Подача изменяется от

S_{min} до S_{max} с шагом $h=(S_{max} -S_{min})/30$. Для создания графика создайте следующую таблицу (см. таблица 2).

Таблица 2

$S, \text{мм/об}$	$n_{min}, \text{мин}^{-1}$	$n_{max}, \text{мин}^{-1}$	$n_1, \text{мин}^{-1}$	$n_2, \text{мин}^{-1}$	$n_{opt}, \text{мин}^{-1}$
[значение S_{min}]	[значение n_{min}]	[значение n_{max}]	[формула]	[формула]	
[формула: =сылка на верхнюю ячейку+h]	[значение n_{min}]	[значение n_{max}]	[формула]	[формула]	
[формула: =сылка на верхнюю ячейку+h]	[значение n_{min}]	[значение n_{max}]	[формула]	[формула]	
....
[значение S_{max}]	[значение n_{min}]	[значение n_{max}]	[формула]	[формула]	[значение n_{opt}]

В формулах ссылки на ячейки со значениями подачи – относительные (**A1**), а на ячейки со значениями постоянных коэффициентов – постоянные (**\$A\$1**). Затем на основании данной таблицы с помощью **Мастера диаграмм** создается диаграмма. Для этого нужно выделить данную таблицу, а затем запустить **Мастер диаграмм**. Пример таблицы и графика дан в приложении А.

Содержание отчета

1. Тема
2. Цель
3. Задание
4. Математическая модель при параметрической оптимизации режимов резания
5. Отчет по результатам вычислений (из Excel).
6. График, который определяет область допустимых значений режимов резания (из Excel).

Отчет оформляется в виде файла **ОТЧЕТ.DOC** в текстовом редакторе Word и распечатывается. Отчет по результатам вычислений и график, который определяет область допустимых значений режимов резания, вставляется в файл **ОТЧЕТ.DOC** из Excel.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой технологический процесс называется оптимальным?
2. Перечислите критерии оптимальности технологического процесса ?
3. Что такое оптимизируемые параметры?
4. Что входит в систему ограничений при оптимизации технологического процесса ?
5. Что такое структурная оптимизация технологического процесса?
6. Что такое параметрическая оптимизация технологического процесса?
7. Какие критерии оптимальности используются при параметрической оптимизации режимов резания?
8. Какие возникают ограничения при параметрической оптимизации режимов резания?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махаринский Е. И., Горохов В. А. Основы технологии машиностроения: Учебник. – Мн.: Выш. шк., 1977.
2. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов. Учебник для вузов по спец. «Технология машиностроения» / С.Н. Корчак и др.; Под ред. С. Н. Корчака. – М.: Машиностроение, 1988.
3. Штайнер Й., Валентин Р. Excel 7 для Windows 95. Справочник / Пер. с нем. – М.: Восточная Книжная Компания, 1997.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

№ ВАР	D, мм	t, мм	n min, мин ⁻¹	n max, мин ⁻¹	Smin, мм/об	Smax, мм/об	Nдв, кВт
13	150	1	10	1600	0,01	0,7	1

Обрабатываемый материал	Tн, мин
Серый чугун	30

Cp	Xp	Yp	Kp	np
92	1	0,45	0,9	0

Cv	Xv	Yv	m	Kv
324	0,4	0,2	0,28	1,1

МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

Оптимизируемые параметры	
n=	135,4
S=	0,7
Ограничения	
n min =	10
n max =	1600
S min =	0,01
S max =	0,7
W_T=	291,8
W_N=	115,3
n*S ^{Yv} =	126,1
n ^(np+1) *S ^{Yp} =	115,3
Целевая функция	
n*S =	94,79

ТАБЛИЦА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКА

$S, \text{мм/об}$	$n_{\text{min}}, \text{МИН}^{-1}$	$n_{\text{max}}, \text{МИН}^{-1}$	$n_1, \text{МИН}^{-1}$	$n_2, \text{МИН}^{-1}$	$n_{\text{опт}}, \text{МИН}^{-1}$
0,01	10	1600	733	916,1	
0,033	10	1600	577,3	535,3	
0,056	10	1600	519,4	421,9	
0,079	10	1600	484,8	361,4	
0,102	10	1600	460,7	322,2	
0,125	10	1600	442,3	294	
0,148	10	1600	427,6	272,5	
0,171	10	1600	415,4	255,3	
0,194	10	1600	405,1	241,2	
0,217	10	1600	396,1	229,4	
0,24	10	1600	388,2	219,2	
0,263	10	1600	381,2	210,4	
0,286	10	1600	374,8	202,6	
0,309	10	1600	369,1	195,6	
0,332	10	1600	363,8	189,4	
0,355	10	1600	359	183,8	
0,378	10	1600	354,5	178,7	
0,401	10	1600	350,3	174	
0,424	10	1600	346,4	169,7	
0,447	10	1600	342,8	165,7	
0,47	10	1600	339,4	162	
0,493	10	1600	336,2	158,5	
0,516	10	1600	333,1	155,3	

S, мм/об	n _{min} , МИН ⁻¹	n _{max} , МИН ⁻¹	n ₁ , МИН ⁻¹	n ₂ , МИН ⁻¹	n _{опт} , МИН ⁻¹
0,539	10	1600	330,2	152,3	
0,562	10	1600	327,5	149,5	
0,585	10	1600	324,8	146,8	
0,608	10	1600	322,3	144,3	
0,631	10	1600	320	141,9	
0,654	10	1600	317,7	139,6	
0,677	10	1600	315,5	137,5	
0,7	10	1600	313,4	135,4	135,4

ОТЧЕТ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ

Целевая ячейка (Максимум)

Ячейка	Имя	Исходно	Результат
\$C\$31	maxF	3	94,78617

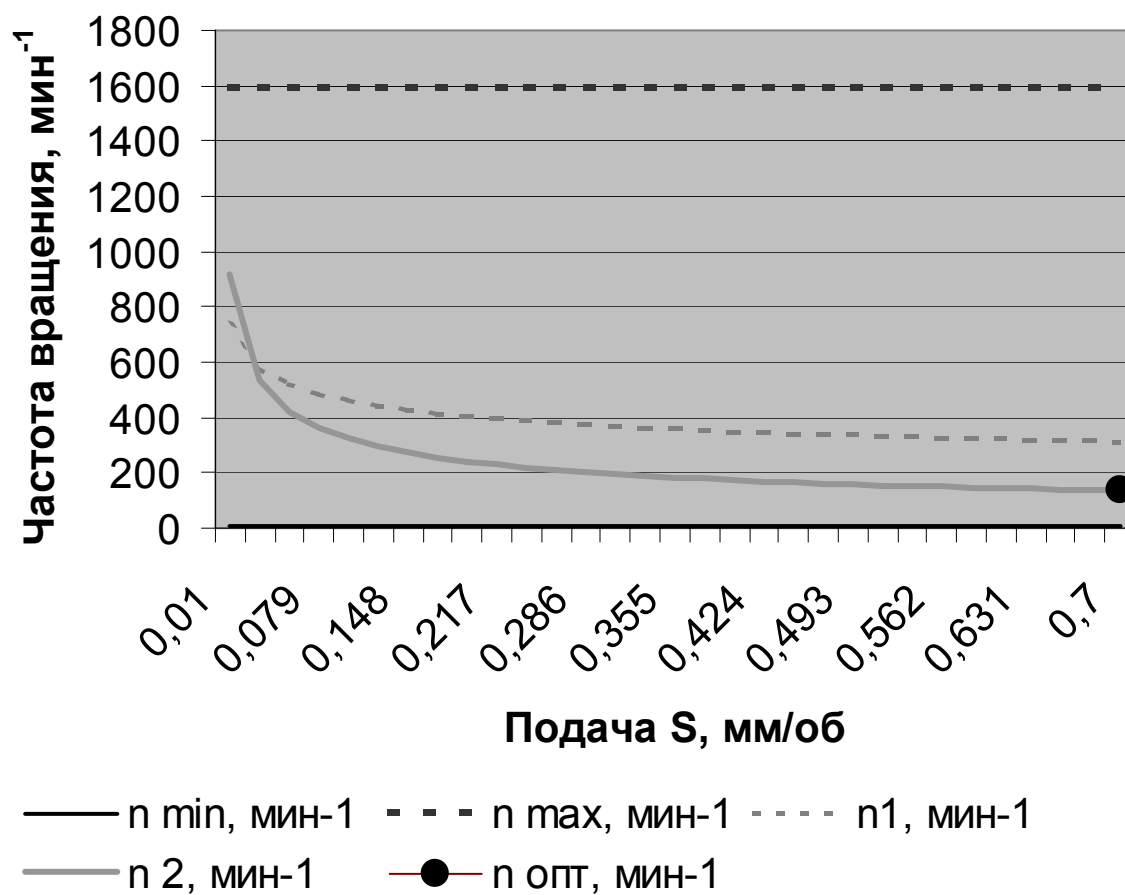
Изменяемые ячейки

Ячейка	Имя	Исходно	Результат
\$B\$17	n	15	135,4088
\$B\$18	S	0,2	0,7

Ограничения

Ячейка	Имя	Значение	формула	Статус	Разница
\$B\$27	n*S^Yv	126,086	\$B\$27<=\$B\$25	не связан.	165,726
\$C\$28	n^(np+1)*S^Yp	115,33	\$C\$28<=\$B\$26	связанное	0
\$B\$17	n	135,409	\$B\$17>=\$B\$21	не связан.	125,409
\$B\$17	n	135,409	\$B\$17<=\$B\$22	не связан.	1464,59
\$B\$18	S	0,7	\$B\$18<=\$B\$24	связанное	0
\$B\$18	S	0,7	\$B\$18>=\$B\$23	не связан.	0,69

Область допустимых значений



ПРИЛОЖЕНИЕ Б – ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Таблица Б.1

№ вар	D,мм	t,мм	$n_{\min}, \text{МИН}^{-1}$	$n_{\max}, \text{МИН}^{-1}$	$S_{\min}, \text{ММ/ОБ}$	$S_{\max}, \text{ММ/ОБ}$	$N_{\text{дв}}, \text{кВт}$
1	100	1	320	3200	0,01	0,175	1,1
2	150	2	12,5	2000	0,01	2,8	10
3	200	1	320	3200	0,05	2,8	1,5
4	125	2	320	3200	0,01	0,175	1,1
5	200	3	10	2000	0,08	27,9	11
6	250	1	30	3000	0,02	0,35	1,5
7	320	2	20	2000	0,01	0,7	4,6
8	75	3	320	3200	0,01	0,175	1,1
9	115	1	40	2000	0,05	2,8	4,2
10	145	2	12,5	1600	0,01	2,8	6,3
11	180	3	20	2000	0,01	0,7	2,8
12	125	1	40	2000	0,06	1,0	4,2

Таблица Б.2

№ вар	Tн,мин	Обрабатываемый материал	Cv	Xv	Yv	m	Kv
1	30	Конструкционная сталь	420	0,15	0,2	0,2	0,35
2	35						
3	35	Серый чугун	292	0,15	0,20	0,2	0,83
4	45						
5	50	Конструкционная сталь	292	0,3	0,15	0,18	0,4
6	55						
7	60	Серый чугун	243	0,15	0,40	0,2	1,0
8	30						
9	40	Ковкий чугун	317	0,15	0,20	0,2	0,8
10	50						
11	60	Серый чугун	324	0,4	0,2	0,28	1,1
12	30						

Таблица Б.3

№ вар	Cp	Xp	Yp	Kp	np
1	300	1,0	0,75	0,8	-0,15

2					
3	92	1,0	0,75	0,9	0
4					
5	384	0,9	0,9	1,0	-0,15
6					
7	123	1,0	0,85	1,1	0
8					
9	100	1,0	0,75	0,8	0
10					
11	92	1,0	0,45	0,9	0
12					