

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**КАФЕДРА МАШИНОСТРОЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ**

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторной работе по дисциплине  
«Математическое моделирование  
технологических задач в машиностроении»

*на тему: «Моделирование процесса резания  
и поиск оптимальных режимов обработки»*

для студентов специальности  
1-36 01 01 «Технология машиностроения»  
дневной, вечерней и заочной форм обучения

УДК 621.9 (075.8)

В методических указаниях приведены основные теоретические сведения о параметрах процесса резания материалов и критериях его оптимизации. Кроме того, в издании содержится полная информация для выполнения лабораторной работы с применением вычислительной техники и табличного процессора Excel, а также требования к содержанию и оформлению отчета. Методические указания предназначены для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения»

Составители: Ю. Н. Саливончик, ст. преподаватель  
А. Н. Парфиевич, ст. преподаватель  
В. А. Сокол, ст. преподаватель

Рецензент: А. С. Вишняков, руководитель группы гальваники и покраски,  
инженер-технолог СП ОАО «Брестгазоаппарат»

## Лабораторная работа

Тема: Моделирование процесса резания и поиск оптимальных режимов обработки

Цель:

- изучить методику параметрической оптимизации режимов резания материалов в машиностроении;
- создать в табличном процессоре Excel модель для нахождения оптимальных значений режимов резания.

### Основные положения

На сегодняшний день невозможно спроектировать идеальный технологический процесс механической обработки детали. Поэтому всегда есть несколько вариантов производства изделия и основная задача инженера-технолога состоит в выборе наиболее перспективного из них с разных точек зрения. Таковым должен быть вариант технологического процесса, обеспечивающий выполнение в конкретных производственных условиях всех требований чертежа детали и дающий наилучшее значение выходных показателей, к которым относятся минимальная себестоимость изготовления и производительность. В таких условиях 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 совершенствования методов автоматизированного проектирования.

Технологический процесс механической обработки деталей резанием характеризуется величинами, которые называются параметрами (величины, определяющие значения элементов процесса) и показателями (различные константы, коэффициенты и т. п., определяющие количественные характеристики процесса и зависящие от принятых величин параметров). К параметрам относятся следующие величины:

- параметры заготовки;
- параметры станка;
- параметры инструмента;
- параметры приспособления.

Показателями технологической операции считаются:

- технические, характеризующие состояние станка, инструмента и заготовки в процессе ее обработки (прочность инструмента, приспособления, отдельных звеньев станка, величины упругих деформаций системы СПИД и др.);
- технологические, характеризующие деталь после обработки (шероховатость поверхности, точность размеров и геометрической формы детали);
- организационно-производственные, обусловленные заданной производительностью станка, тактом поточной линии и др.;
- экономические, определяющие себестоимость механической обработки.

Задача оптимизации технологического процесса предусматривает наличие трех основных элементов:

- 1) математической модели процесса;
- 2) функции цели(критерия оптимальности);
- 3) метода оптимизации (оптимизационного алгоритма).

Для решения задачи оптимизации необходимо ее составные части представить в математической форме. Критерий оптимальности выражается как функция от оптимизируемых параметров и прочих характеристик процесса.

Функциональные связи между параметрами и показателями технологической операции являются техническими ограничениями режима резания и в совокупности составляют математическую модель оптимального режима обработки.

При расчете режимов резания наиболее важными ограничениями являются следующие:

- режущие возможности инструмента;
- мощность электропривода главного движения станка;
- заданная производительность станка на проектируемой операции;
- наименьшая скорость резания, допускаемая кинематикой станка (наименьшее число оборотов шпинделя);
- наибольшая технологически допустимая скорость резания;
- наибольшая скорость резания, допускаемая кинематикой станка (наибольшее число оборотов шпинделя);
- прочность режущего инструмента;
- жесткость режущего инструмента;
- точность обработки;
- наименьшая подача, допускаемая кинематикой станка;
- наибольшая подача, допускаемая кинематикой станка;
- наибольшая подача, допускаемая требованиями, предъявляемыми к шероховатости обработанной поверхности.

Под оптимальным режимом резания понимаются такие значения параметров (скорости резания и подачи), при которых выполняются все технологические ограничения, накладываемые на процесс обработки, достигается максимальная производительность операции. При этом себестоимость обработки и недоиспользование ресурса режущего инструмента должно быть минимальным.

Выбор критерия оптимальности определяется уровнем рассмотрения задачи оптимизации. Экономические критерии используются на производственном уровне. Решения, полученные на их основе, зависят от многих организационно-технических факторов и условий, в которых функционирует станок. В результате полученное решение будет оптимальным только для конкретных условий производства.

Применительно к поставленной задаче оптимизации режимов резания на отдельной операции целесообразно использовать технологический критерий оптимальности – показатель производительности. При этом критерии надежности инструмента, точности и качества обработки включены в состав технологических ограничений.

*Ограничение 1.* Устанавливает взаимосвязь расчетной величины подачи ( $s$ ) с подачей, допускаемой кинематикой станка по минимальному значению, реализуемому на технологическом оборудовании. Расчетная величина подачи не может быть меньше, чем минимальная ( $s_{min}$ ), которая имеется в ряду подач станка, т. е. должно выполняться условие:

$$s \geq s_{min} . \quad (1)$$

*Ограничение 2.* Устанавливает взаимосвязь расчетной величины подачи с подачей, допускаемой кинематикой станка по допустимому максимуму. Расчетная величина подачи не может быть больше, чем максимальная ( $s_{max}$ ), которая имеется в ряду подач станка, т. е. должно выполняться условие:

$$s \leq s_{max} . \quad (2)$$

*Ограничение 3.* Устанавливает взаимосвязь расчетной скорости резания или числа оборотов шпинделя ( $n$ ) с кинематикой станка по минимально возможному числу оборотов шпинделя для станка. Скорость резания не может быть выбрана меньше, чем возможная, исходя из наименьшего числа оборотов используемого оборудования ( $n_{min}$ ), т. е. должно иметь место неравенство:

$$n \geq n_{min} . \quad (3)$$

*Ограничение 4.* Устанавливает взаимосвязь расчетной скорости резания с кинематикой станка по максимуму. Скорость резания не может быть выбрана больше, чем возможная, исходя из наибольшего числа оборотов станка ( $n_{max}$ ), т. е. должно иметь место неравенство:

$$n \leq n_{max} . \quad (4)$$

*Ограничение 5.* Устанавливает взаимосвязь между скоростью резания ( $v$ ), обусловленной принятой стойкостью инструмента ( $T$ ), глубиной резания ( $t$ ), подачей, с одной стороны, и скоростью резания, определяемой кинематикой станка, с другой стороны. Эмпирическая скорость резания для обработки на токарном станке определяется по формуле:

$$v = \frac{C_v}{T^m \cdot t^x \cdot s^y} , \quad (5)$$

где  $C_v$  – эмпирический коэффициент скорости резания;  
 $m, x, y$  – табличные значения степеней.

Скорость резания, согласно кинематической схеме станка, определяется по общеизвестной формуле:

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} , \quad (6)$$

где  $d$  – расчетный диаметр детали или инструмента, мм.

Приравнивая правые части формул (5) и (6), а также выделяя в левую часть искомые элементы режима обработки, получим выражение для следующего технического ограничения:

$$n \cdot s^y \leq \frac{1000C_v}{\pi \cdot d \cdot T^m \cdot t^x}. \quad (7)$$

*Ограничение 6.* Устанавливает взаимосвязь между эффективной мощностью ( $N_{эф}$ ), затрачиваемой на процесс резания, и мощностью электропривода главного движения станка ( $N$ ).

Эффективная мощность (кВт), затрачиваемая на процесс резания металла при токарной обработке, определяется по формуле:

$$N_{эф} = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60}, \quad (8)$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая усилия резания, Н.

$P_z$  определяется по следующей формуле:

$$P_z = C_p \cdot t^{x_p} \cdot s^{y_p} \cdot v^{z_p} \cdot K_p, \quad (9)$$

где  $C_p$  – эмпирический коэффициент силы резания;

$x_p, y_p, z_p$  – табличные значения степеней для расчета силы резания;

$K_p$  – поправочный коэффициент силы резания.

Мощность, затрачиваемая на процесс резания, должна быть не больше мощности электродвигателя главного привода станка с учетом потерь на трение в кинематической цепи от электродвигателя до рабочего органа станка, на котором установлен режущий инструмент, т. е. должно выполняться неравенство:

$$N_{эф} = N \cdot \eta, \quad (10)$$

где  $N$  – установленная мощность электродвигателя главного привода станка, кВт;

$\eta$  – коэффициент полезного действия механизма передачи от электродвигателя к рабочему органу станка.

Подставив в неравенство (10) значение из формулы (8) и решив его относительно элементов режима резания  $n$  и  $s$ , получим выражение для очередного технического ограничения:

$$n^{z_p+1} \cdot s^{y_p} \leq \frac{1020 \cdot 60 \cdot 1000^{z_p+1} \cdot N \cdot \eta}{C_p \cdot t^{x_p} \cdot K_p \cdot \pi^{z_p+1} \cdot d^{z_p+1}}. \quad (11)$$

*Ограничение 7.* Устанавливает взаимосвязь расчетных скорости резания и подачи с допустимыми по прочности режущего инструмента.

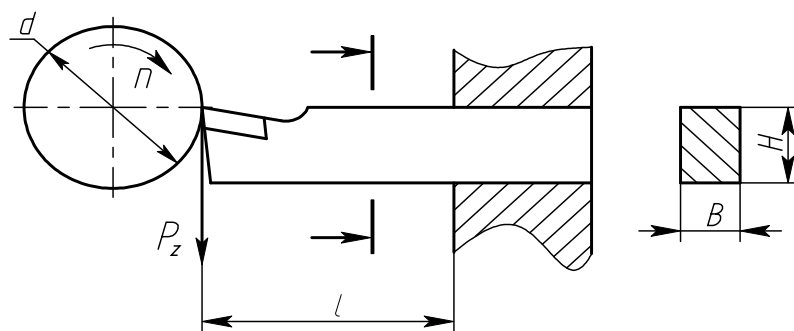


Рисунок 1 – Схема нагружения резца в процессе обработки.

Рассматривая резец как балку (см. рисунок 1), нагруженную на одном конце сосредоточенной силой  $P_z$  (тангенциальная составляющая силы резания), можно записать следующее:

$$\sigma_u \geq \frac{M_u \cdot K_3}{W}, \quad (12)$$

где  $\sigma_u$  – предел прочности материала державки резца при изгибе, кг/мм<sup>2</sup>;

$M_u$  – изгибающий момент от действия тангенциальной составляющей силы резания, кг·мм;

$K_3$  – коэффициент запаса прочности;

$W$  – момент сопротивления сечения державки резца, мм<sup>3</sup>.

Изгибающий момент в месте закрепления резца определяется по формуле:

$$M_u = P_z \cdot l, \quad (13)$$

где  $l$  – вылет резца из резцедержателя, мм.

$$M_u = C_p \cdot t^{x_p} \cdot s^{y_p} \cdot v^{z_p} \cdot K_p \cdot l. \quad (14)$$

Для прямоугольного сечения момент сопротивления подсчитывается по формуле:

$$W = \frac{B \cdot H^2}{6}, \quad (15)$$

где  $B$ ,  $H$  – габаритные размеры державки резца, мм

Подставив соотношения (14) и (15) в неравенство (12), и перенеся в левую часть неравенства элементы режимов резания, получим:

$$n^{z_p} \cdot s^{y_p} \leq \frac{1000^{z_p} \cdot B \cdot H^2 \cdot \sigma_u}{6C_p \cdot t^{x_p} \cdot K_p \cdot \pi^{z_p} \cdot d^{z_p} \cdot l \cdot K_3}. \quad (16)$$

*Ограничение 8.* Устанавливает взаимосвязь расчетной величины подачи с подачей, допускаемой требованиями, предъявляемыми к шероховатости обработанной поверхности.

При получистовой и чистовой обработке максимальную величину подачи ограничивает требуемая шероховатость обработанной поверхности, так как чем больше подача, тем больше шероховатость обработанной поверхности. Поэтому должно выполняться условие:

$$s \leq s_v, \quad (17)$$

где  $s_v$  – максимально допустимая подача, получение данного класса шероховатости обработанной поверхности, мм/об.

Принято считать, что основной причиной шероховатости является копирование угла при вершине резца, т.е. ограниченной части режущей кромки. Поэтому расчетные зависимости, используемые для определения шероховатости, являются чисто геометрическими.

Основной математической зависимостью, отвечающей такому подходу, является распространенная формула, связывающая допустимую подачу с заданной шероховатостью ( $R_z$ ) и радиусом закругления при вершине резца ( $r$ ):

$$s \leq 0,07 \sqrt{R_z \cdot r}. \quad (18)$$

Ранее были выведены неравенства технологических ограничений, накладываемых на процесс точения. В совокупности с критерием оптимальности они представляют собой математическую модель процесса резания на станках.

### **Поиск решения**

Задача отыскания оптимального решения при обработке материалов резанием формулируется следующим образом: по заданным исходным данным определить элементы режима резания (частоту вращения шпинделя в минуту, величину подачи на один оборот изделия), при которых критерий оптимальности достигал бы максимума.

Для решения этой задачи целесообразно применить метод линейного программирования. Постановка задачи линейного программирования формулируется как: имеется линейная функция нескольких переменных, которые, в свою очередь, должны удовлетворять ограничениям, выраженным в виде системы линейных неравенств. Требуется отыскать такие неотрицательные значения переменных, удовлетворяющие системе ограничений, при которых величина, являющаяся их линейной функцией, принимала бы наибольшее значение.

Из постановки задачи следует, что при применении метода линейного программирования аналитическое решение задачи определения оптимальных режимов резания всегда возможно при любом числе неизвестных, если имеются ограничивающие условия и зависимости, связывающие эти неизвестные.

Для анализа математической модели процесса резания с использованием метода линейного программирования необходимо все неравенства технических ограничений и уравнение целевой функции привести к линейному виду.

Сведем неравенства технологических ограничений и уравнение целевой функции в одну систему. Переход к линейной системе осуществляется логарифмированием.



Целевая функция может быть представлена в следующем виде:

$$f = n \cdot s \rightarrow \max . \quad (19)$$

Прологарифмировав выражение (19), получим:

$$\ln(f) = \ln(n) + \ln(s) \rightarrow \max . \quad (20)$$

Объединив все вышепредставленные ограничения (1-4, 7, 11, 16, 18) и целевую функцию (19) в систему, получим математическую модель. Данная модель представляет собой универсальную модель процесса резания на станках токарной группы. Входящая в математическую модель система неравенств характеризует те основные технические ограничения, в рамках которых протекает процесс резания.

Прологарифмировав эту систему и обозначив  $\ln(n) = x_1$  и  $\ln(s) = x_2$ , а логарифмы правых частей неравенств за переменные  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , получим следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_2 \geq C_1 \\ x_2 \leq C_2 \\ x_1 \geq C_3 \\ x_1 \leq C_4 \\ x_1 + ux_2 \leq C_5 \\ (z_p + 1)x_1 + (y_p)x_2 \leq C_6 \\ (z_p)x_1 + (y_p)x_2 \leq C_7 \\ x_2 \leq C_8 \\ x_1 + x_2 \rightarrow \max \end{array} \right. . \quad (21)$$

Полученная система линейных неравенств и линейной функции, подлежащей оптимизации, в совокупности представляет собой формальное описание процесса резания металлов на токарных станках.

### Порядок выполнения работы.

1. Изучите основные положения данных методических указаний.
2. Запустите табличный процессор **Microsoft Excel**. Создайте в нем новый файл с таблицей исходных данных согласно своего варианта. Варианты заданий с данными согласуйте с преподавателем.
3. Создайте модель для оптимизации режимов резания. Для этого в новой таблице созданного файла задайте оптимизируемые параметры ( $n$  и  $s$ ), значения которых вручную не заполняются, а также ограничения по стойкости, мощности, частоте и подаче и др. (формулы 1-4, 7, 11, 16, 18) и целевую функцию. Ячейкам с параметрами, ограничениями и целевой функцией присвойте имена через пункты меню **Вставка/Имя/Присвоить**.

Таблица 1 – Модель оптимизации режимов резания

<b>Оптимизируемые параметры</b>	
1	2
$n$	[ ], имя ячейки $n$
$s$	[ ], имя ячейки $s$
<b>Ограничения</b>	
$s_{min}$	[= значение из исх. данных], имя ячейки $s_{min}$
$s_{max}$	[= значение из исх. данных], имя ячейки $s_{max}$
$n_{min}$	[= значение из исх. данных], имя ячейки $n_{min}$
$n_{max}$	[= значение из исх. данных], имя ячейки $n_{max}$
$n \cdot s^y$	[= формула 7], имя ячейки $n \cdot s^y$
$n^{z_{p+1}} \cdot s^{y_p}$	[= формула 11], имя ячейки $n^{z_{p+1}} \cdot s^{y_p}$
$n^{z_p} \cdot s^{y_p}$	[= формула 16], имя ячейки $n^{z_p} \cdot s^{y_p}$
$Rz(s)$	[= формула 18], имя ячейки $Rz(s)$
<b>Целевая функция</b>	
$n \cdot s$	[= формула 19], имя ячейки $n \cdot s$

4. Отыщите оптимальные значения частоты вращения шпинделя ( $n$ ) и подачу инструмента ( $s$ ).

Для этого выделите ячейку с целевой функцией (целевая ячейка). Выберите команду меню **Сервис/Поиск решения**. При этом появится диалоговое окно **Поиск решения**. В диалоговом окне нужно задать следующие параметры:

– в поле **Целевая ячейка** будет представлена ссылка на выделенную ячейку, т. е. ячейку со значением целевой функции;

– в группе **Равной** установите переключатель в положение **максимальному значению**;

– в поле **Изменяя ячейки** укажите ячейки со значениями оптимизируемых параметров  $n$  и  $s$ ;

– для ввода ограничений нажмите кнопку **Добавить**; в открывшемся диалоговом окне нужно будет указать ссылки на значения оптимизируемых параметров и ограничения;

– после ввода ограничений нажмите кнопку **Выполнить**, затем в диалоговом окне **Результаты поиска решения** выберите **Тип отчета - Результаты** и нажмите ОК

5. Создайте график при помощи **Мастера диаграмм**, 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:

– ограничения по кинематическим возможностям оборудования:

$$n = n_{\min},$$

$$n = n_{\max};$$

– ограничение по стойкости режущего инструмента:

$$n = \frac{1000C_v}{\pi \cdot d \cdot T^m \cdot t^x \cdot s^y},$$

– ограничение по мощности привода главного движения:

$$n = z_p + 1 \sqrt{\frac{1020 \cdot 60 \cdot 1000^{z_p+1} \cdot N \cdot \eta}{C_p \cdot t^{x_p} \cdot K_p \cdot \pi^{z_p+1} \cdot d^{z_p+1} \cdot s^{y_p}}}$$

– ограничение по прочности режущего инструмента:

$$n = z_p \sqrt{\frac{1000^{z_p} \cdot B \cdot H^2 \cdot \sigma_u}{6C_p \cdot t^{x_p} \cdot K_p \cdot \pi^{z_p} \cdot d^{z_p} \cdot l \cdot K_3 \cdot s^{y_p}}}$$

Подача изменяется от  $s_{min}$  до  $s_{max}$  с шагом  $h = \frac{(s_{max} - s_{min})}{25}$ .

На графике отметить расположение точки оптимальных значений режимов резания, полученных при моделировании.

### Содержание отчета

1. Тема
2. Цель работы
3. Краткие теоретические сведения.
4. Исходные данные для моделирования согласно заданию.
5. Математическая модель параметрической оптимизации режимов резания.
6. Отчет по результатам вычислений.
7. График, который определяет область допускаемых значений режимов резания.
8. Вывод.

### Контрольные вопросы

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

### Список использованной литературы.

1. Махаринский, Е. И. Основы технологии машиностроения: учебник / Е. И. Махаринский, В. А. Горохов. – Минск: 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. Плотников, А. Л. Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ; Монография / А. Л. Плотников, А. О. Таубе. – Волгоград. государственный технический университет. – Волгоград, 2003. – 184 с.
4. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4 изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – Т.2– 469 с.

Учебное издание

**Составители:**

*Саливончик Юрий Николаевич*

*Сокол Виктор Александрович*

*Парфиевич Андрей Николаевич*

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторной работе по дисциплине  
«Математическое моделирование  
технологических задач в машиностроении»

*на тему: «Моделирование процесса резания  
и поиск оптимальных режимов обработки»*

для студентов специальности  
1-36 01 01 «Технология машиностроения»  
дневной, вечерней и заочной форм обучения

Ответственный за выпуск: Саливончик Ю.Н.

Редактор: Боровикова Е.А.

Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.

Корректор: Никитчик Е.В.

---

Подписано в печать 12.12.2018 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага «Performer».  
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 0,69. Уч. изд. л. 0,75. Заказ № 1508. Тираж экз.  
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный  
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.