

ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Оптимизация технологических процессов

Задачи проектирования технологических процессов (ТП) являются многовариантными.

К многовариантным относятся, например, задачи выбора технологического маршрута, оборудования, содержания операций, последовательности рабочих и холостых ходов инструмента, режущего инструмента, режимов резания и т.д.

В разрабатываемом ТП число возможных комбинаций переходов, схем базирования, методов обработки и компоновок операций даже для простых деталей значительно, а для более сложных возрастает чрезвычайно.

Разные варианты ТП изготовления одной и той же детали вследствие различий в структуре, применяемом оборудовании, инструменте, режимах резания и т.д. имеют различные выходные показатели: производительность, себестоимость, расход металла, загрузку оборудования и др.

Оптимизация технологических процессов

Различают три вида оптимизации ТП:

1. Структурную.
2. Параметрическую.
3. Структурно - параметрическую.

Структурная оптимизация - это определение оптимальной структуры ТП (вида заготовки, технологического маршрута, модели оборудования, типоразмера инструмента и т.д.).

Параметрическая оптимизация ТП, заключается в расчете оптимальных припусков, операционных размеров размеров, режимов резания.

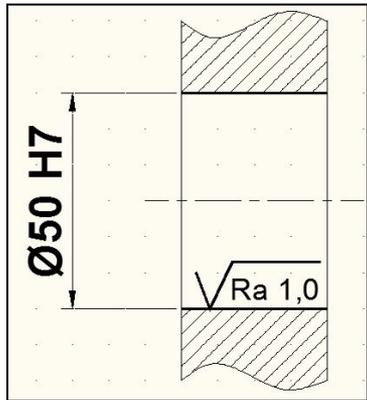
Структурно - параметрическая оптимизация представляет собой комбинацию двух первых.

Структурная оптимизация технологических процессов

Структурная оптимизация рассматривает последовательно каждую задачу технологического проектирования (выбор технологического маршрута, оборудования, содержания операций и технологической оснастки. Таким образом, весь процесс проектирования расчленяется на несколько взаимосвязанных уровней.

Процесс проектирования на каждом уровне представляет собой многовариантную процедуру. В результате проектирования на всех уровнях образуется граф допустимых вариантов ТП, отвечающих заданным условиям.

Структурная оптимизация технологических процессов



D= 50 H7

Прокат

Поковка

Сверлить

Вырубить

Расточить

Зенкеровать

Расточить

Зенкеровать

Расточить

Протянуть

Расточить

Протянуть

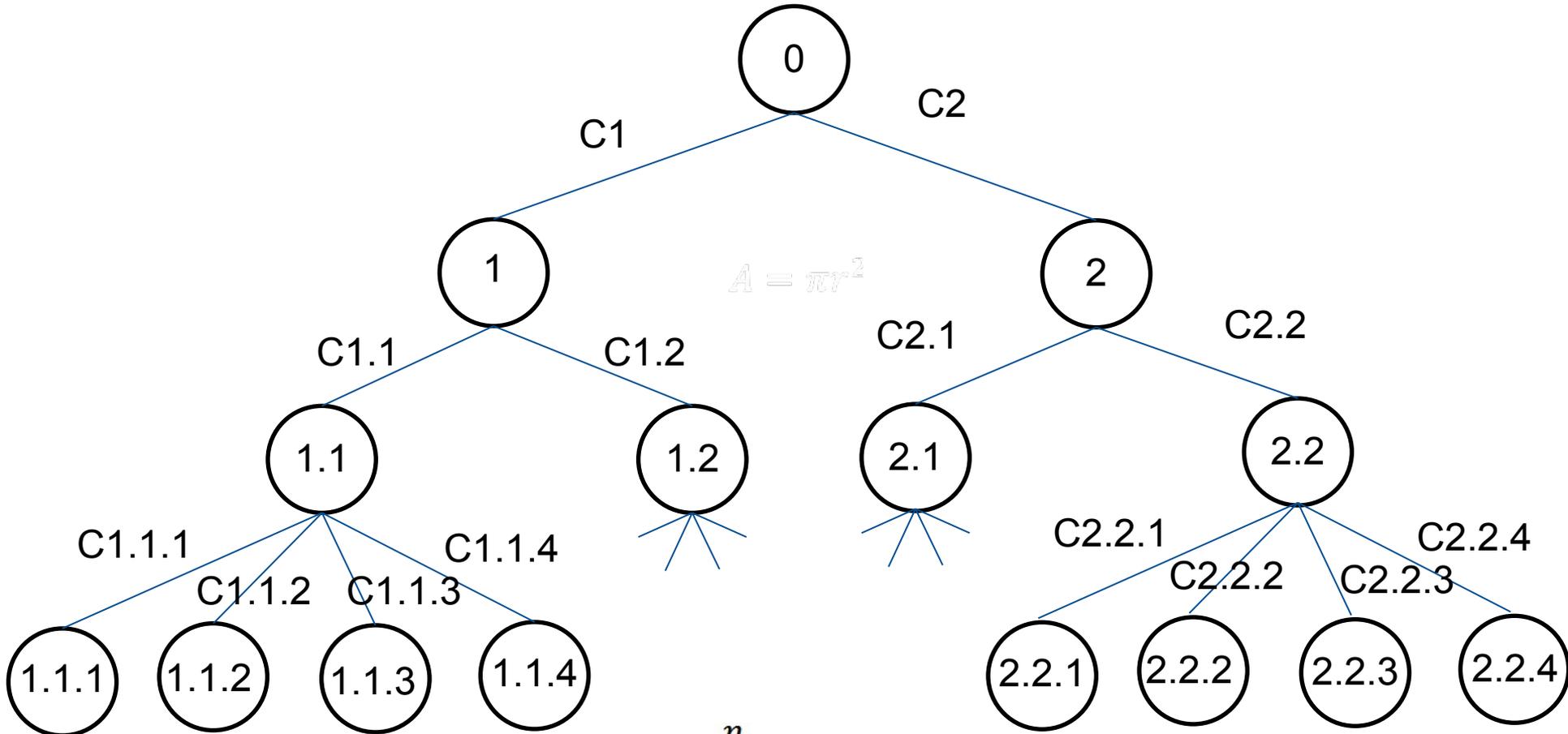
Развернуть

Шлифовать

Развернуть

Шлифовать

Структурная оптимизация технологических процессов



$$C = \sum_{i=1}^n C_i \rightarrow \min$$

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Задача параметрической оптимизации технологических переходов заключается в определении оптимальных режимов резания, которые обеспечивают минимальные издержки производства при механической обработке резанием заготовок деталей машин.

Автоматизация задачи определения оптимальных режимов резания состоит из следующих этапов:

- 1. Постановка задачи параметрической оптимизации технологических переходов;**
- 2. Составление функциональной модели процесса резания;**
- 3. Определение содержания информационного обеспечения процедуры параметрической оптимизации;**
- 4. Выбор метода решения задачи и составление схемы алгоритма;**
- 5. Программирование процедуры оптимизации.**

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Выбор критерия оптимизации

На первом этапе постановки задачи параметрической оптимизации необходимо определить критерий оптимизации.

При решении задачи определения оптимальных режимов резания в качестве критерия оптимизации могут быть использованы технические и экономические критерии. Наиболее простыми для расчета являются технические критерии оптимизации. Например, при известном экономически выгодном периоде стойкости инструмента в качестве критерия оптимизации может быть использовано основное время t_o выполнения технологического перехода. В этом случае целевая функция будет иметь очень простой вид

$$t_o = \frac{L_{p.x.}}{S_{mi}} \cdot i,$$

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Выбор критерия оптимизации

Принимая во внимание, весьма динамичное изменение цен на оборудование, технологическую оснастку, различные виды энергии и рабочую силу наиболее объективными следует считать экономические критерии. При определении оптимальных режимов резания в качестве экономического критерия параметрической оптимизации может быть использована технологическая себестоимость перехода C_T , которая может быть определена по следующему уравнению

$$C_T = C_{с.ч.} \left(t_o + \frac{1}{k} t_{с.и.} \right) / 60,$$

где $C_{с.ч.}$ – стоимость станко-часа в руб.;

k – количество технологических переходов, выполненных за период стойкости инструмента;

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Определение ограничений по техническим требованиям, предъявляемым к обработанной поверхности и характеристикам элементов технологической системы

На втором этапе постановки задачи параметрической оптимизации необходимо определить состав ограничений, которые определяются техническими требованиями, предъявляемыми к обработанной поверхности и характеристиками элементов технологической системы:

- 1 Станок**
- 2 Приспособление**
- 3 Инструмент**
- 4 Деталь**

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Определение ограничений по техническим требованиям, предъявляемым к обработанной поверхности и характеристикам элементов технологической системы

При постановке задачи оптимизации режимов резания технические характеристики металлорежущего станка могут определять следующие ограничения.

Для станков со ступенчатым регулированием скорости вращения шпинделя искомое оптимальное значение частоты вращения шпинделя может принадлежать упорядоченному множеству ряда частот вращения шпинделя $\{n_1, n_2, \dots, n_k\}$. Это ограничение может быть задано в следующем виде

$$n_i \in \{n_1, n_2, \dots, n_k\},$$

где n_i – искомая оптимальная частота вращения шпинделя станка;

k – количество ступеней частоты вращения шпинделя станка.

Аналогичным образом может быть задано ограничение по ступенчатому ряду $\{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ продольных или поперечных подач

$$S_j \in \{S_1, S_2, \dots, S_m\},$$

где S_i – искомая оптимальная подача станка;

m – количество ступеней подач станка.

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Определение ограничений по техническим требованиям, предъявляемым к обработанной поверхности и характеристикам элементов технологической системы

При бесступенчатом регулировании привода шпинделя и подачи эта же система ограничений будет иметь следующий вид

$$n_{\min} \leq n_i \leq n_{\max},$$

где n_{\min} , n_{\max} – соответственно минимальное и максимальное значения частоты вращения шпинделя станка, определяющие диапазон регулирования;

$$S_{\min} \leq S_i \leq S_{\max},$$

S_{\min} , S_{\max} - соответственно минимальное и максимальное значения подачи, определяющие диапазон регулирования продольных или поперечных подач станка;

Параметрическая оптимизация технологических процессов

**Определение ограничений по техническим требованиям,
предъявляемым к обработанной поверхности и характеристикам
элементов технологической системы**

Некоторые модели металлорежущих станков с ЧПУ имеют различные способы регулирования привода шпинделя и подачи. Например, скорость вращения шпинделя может регулироваться ступенчато, а привод подачи бесступенчато.

Такая комбинация способов регулирования основных движений станка требует задания ограничений следующего вида

$$n_i \in \{n_1, n_2, \dots, n_k\},$$

$$S_{\min} \leq S_i \leq S_{\max},$$

Параметрическая оптимизация технологических процессов

**Определение ограничений по техническим требованиям,
предъявляемым к обработанной поверхности и характеристикам
элементов технологической системы**

При черновой, предварительной обработке поверхностей могут быть заданы ограничения по допустимым нагрузкам на различные механизмы и узлы станка, например, усилие допустимое механизмом продольной подачи станка

где P_x – составляющая силы резания в направлении продольной подачи;
 $P_{п.п.}$ – усилие, допустимое механизмом продольной подачи станка .

При параметрической оптимизации технологических переходов сверления отверстий необходимо учитывать ограничение по осевому усилию на шпиндель станка. Это ограничение может быть задано следующим образом

где P_y – составляющая силы резания в направлении подачи;
 $P_o.$ – нагрузка, допустимая на шпиндель станка в осевом направлении или на механизм подачи.

Параметрическая оптимизация технологических процессов

**Определение ограничений по техническим требованиям,
предъявляемым к обработанной поверхности и характеристикам
элементов технологической системы**

При предварительной обработке заготовок необходимо учитывать ограничение по мощности привода шпинделя станка

$$N_p \leq N_{np} \eta ,$$

где N_p – мощность затрачиваемая на резание;

N_{np} – мощность привода главного движения станка;

η – КПД привода шпинделя станка

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Определение ограничений по техническим требованиям, предъявляемым к обработанной поверхности и характеристикам элементов технологической системы

Эксплуатационные характеристики второго элемента технологической системы - станочного приспособления необходимо учитывать при оптимизации процессов резания связанных с удалением значительных припусков. Например, при предварительном точении заготовок установленных в центрах, один из которых является поводковым необходимо учитывать ограничение по предельно допустимому крутящему моменту $M_{к.д.}$.

$$M_{к.р.} \leq M_{к.д.},$$

где $M_{к.р.}$ – крутящий момент, создаваемый главной составляющей P_z силы резания;

$M_{к.д.}$ – предельный крутящий момент, передаваемый поводковым центром.

При чистовом точении поверхностей или при точении заготовок небольших размеров, закрепленных в трехкулачковом самоцентрирующемся патроне, может быть задано ограничение по предельно допустимой частоте вращения токарного патрона

$$n_i \leq n_{m.n.max},$$

где $n_{m.n.max}$ – предельно допустимая частота вращения токарного патрона.

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Определение ограничений по техническим требованиям, предъявляемым к обработанной поверхности и характеристикам элементов технологической системы

Третий компонент технологической системы – режущий инструмент, может определять в общем случае следующую группу ограничений.

Ограничение по периоду стойкости инструмента

$$T \leq T_{\text{э}} ,$$

где T - период стойкости инструмента, который соответствует оптимальной комбинации n_i , S_j ;

$T_{\text{э}}$ - экономически рациональный период стойкости инструмента.

Для учёта возможного диапазона скоростей резания характерных для данного инструментального материала целесообразно задать следующие ограничения.

Ограничение по скорости резания, при которой начинается процесс наростообразования

$$V_i \leq V_n ,$$

где V_i – оптимальное значение скорости резания

V_n - скорость резания, при которой начинается процесс наростообразования.

Параметрическая оптимизация технологических процессов

**Определение ограничений по техническим требованиям,
предъявляемым к обработанной поверхности и характеристикам
элементов технологической системы**

**Ограничение по скорости резания, соответствующей красностойкости
инструментального материала**

$$V_i \leq V_k,$$

где V_k - скорость резания, соответствующая красностойкости инструментального материала.

При обработке поверхностей заготовок с большими глубинами резания необходимо учитывать ограничения связанные с прочностью режущего инструмента.

Например, для резцов оснащенных твердосплавными режущими пластинами в зависимости от толщины режущей пластины и глубины резания может быть задана предельно допустимая подача.

$$S_i \leq S_{доп},$$

где $S_{доп}$ - подача допустимая прочностью режущей пластины.

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Определение ограничений по техническим требованиям, предъявляемым к обработанной поверхности и характеристикам элементов технологической системы

Ограничения, связанные с четвертым компонентом технологической системы – деталью, должны учитывать требования к точности, качеству обработанной поверхности и к жесткости детали.

Важным ограничением, учитывающим деформацию заготовки в процессе обработки и исключающим изменение формы обрабатываемой поверхности сверх допустимых отклонений, является ограничение по величине составляющей силы резания P_y

$$P_y \leq P_{доп},$$

где $P_{доп}$ – сила вызывающая допустимую упругую деформацию заготовки или (и) инструмента в процессе резания.

При обработке поверхностей заготовок с обеспечением требуемой высоты микронеровностей Ra необходимо задавать ограничение по предельному значению шероховатости обработанной поверхности

$$Ra \leq R_{anno},$$

где $R_{пов}$ - шероховатость обработанной поверхности, которая задана на чертеже детали или операционном эскизе.

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Функциональная модель процесса резания

Параметрическая оптимизация технологических переходов выполняется с использованием функциональных моделей процессов резания.

Функциональная модель, предназначенная для оптимизации режима резания, представляет собой совокупность уравнений, которые описывают влияние оптимизируемых параметров перехода - частоты вращения шпинделя n и подачи S , на различные выходные параметры процесса резания.

К выходным параметрам функциональной модели процесса резания в общем случае относятся, скорость резания V , стойкость режущего инструмента T , составляющие силы резания P_x , P_y , P_z , мощность затрачиваемая на резание N_p , шероховатость обработанной поверхности R_a , точность формы и взаимного положения обрабатываемых поверхностей Δf , упругие деформации элементов технологической системы.

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Функциональная модель процесса резания

Например, функциональная математическую модель процесса продольного точения представляет собой следующую совокупность уравнений.

Скорость резания V при продольном точении определяется по уравнению

$$V = \frac{\pi D n_i}{1000},$$

где D – диаметр обрабатываемой поверхности.

Период стойкости инструмента T при продольном точении

$$T = \left(\frac{C_v k_v}{V t^x S_j^y} \right)^{\frac{1}{m}},$$

где C_v, K_v, x, y, m - коэффициенты и показатели степеней для вычисления скорости резания, задаваемые нормативами для заданных условий обработки;

t – глубина резания, определяемая величиной операционного припуска.

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Функциональная модель процесса резания

Главная составляющая P_z силы резания при продольном точении

$$P_z = 10 C_p t^{x_p} S_j^{y_p} V^{n_p} k_p ,$$

где C_p , k_p , x_p , y_p , n_p - коэффициенты и показатели степеней в формулах для вычисления скорости резания и силы резания[10];

Мощность резания при продольном точении

$$N = \frac{P_z D}{1020 \cdot 60} ,$$

Шероховатость обработанной поверхности [9].

$$Ra = k_0 \frac{S_j^{k_1} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{\rho^{k_2} V^{k_3}} ,$$

где r – радиус при вершине резца;

γ - передний угол режущей пластины;

ρ - радиус при вершине резца;

k_0 , k_1 , k_2 , k_3 , k_4 – эмпирические коэффициенты.

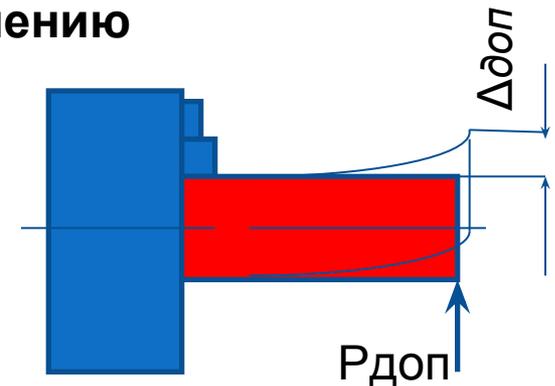
Параметрическая оптимизация технологических процессов

Функциональная модель процесса резания

Функциональная модель процесса резания

При точении с большими глубинами резания сила $P_{доп}$, вызывающая допустимую упругую деформацию заготовки, консольно закрепленной в токарном патроне, может быть определена по уравнению

$$P_{доп} = \frac{\Delta_{доп} \cdot E \cdot I}{l^3},$$



где $\Delta_{доп}$ – допустимая упругая деформация заготовки;
 E – модуль упругости материала заготовки;
 I – момент инерции поперечного сечения заготовки;
 l – вылет заготовки из кулачков токарного патрона.

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Информационное обеспечение процедуры параметрической оптимизации

Таблица 6. Справочник нормативных данных для расчета тангенциальной

составляющей силы резания P_z

Код группы инструментов	Код группы инструментального материала	Код группы обрабатываемого материала	Коэффициент K_{sp}	Коэффициент $K_{фр}$	Коэффициент $K_{гр}$	Коэффициент $K_{фр}$	Коэффициент $K_{гр}$	Коэффициент C_R	Показатель степени χ_R	Показатель степени γ_R	Показатель степени β_R
1	2	4	0,95	1,0	1,0	1,0	1,0	300	1,0	0,75	-0,15
2	1	...	...	...				...	...	...	...

Таблица 7. Справочник нормативных данных для расчета радиальной составляющей силы резания P_x

Код группы инструментов	Код группы инструментального материала	Код группы обрабатываемого материала	Коэффициент K_{sp}	Коэффициент $K_{фр}$	Коэффициент $K_{гр}$	Коэффициент $K_{фр}$	Коэффициент $K_{гр}$	Коэффициент C_R	Показатель степени χ_R	Показатель степени γ_R	Показатель степени β_R
1	2	4	0,95	0,5	1,4	1,0	1,0	243	0,9	0,6	-0,3
2	1	...	...	...				...	...	...	...

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Выбор метода решения задачи и схема алгоритма оптимизации режима резания

Анализ уравнений, которые входят в состав функциональных моделей различных процессов резания показывают, что задача нахождения оптимальных режимов резания представляет собой задачу нелинейного математического программирования. Некоторые уравнения, входящие в состав функциональных моделей, являются нелинейными. Ограничения, налагаемые на область поиска экстремума целевой функции, представляют собой равенства и неравенства. Поиск экстремума целевой функции может выполняться, как на дискретном множестве независимых переменных n_i , S_j , при ступенчатом регулировании частоты вращения шпинделя и подачи инструмента, так и на непрерывном пространстве независимых переменных, если у станка регулирование частоты вращения и подачи производится бесступенчато. Возможны и другие варианты регулирования, например, частота вращения шпинделя станка регулируется ступенчато, а подача суппорта бесступенчато, это создает дополнительные проблемы при решении задачи поиска экстремума целевой функции.

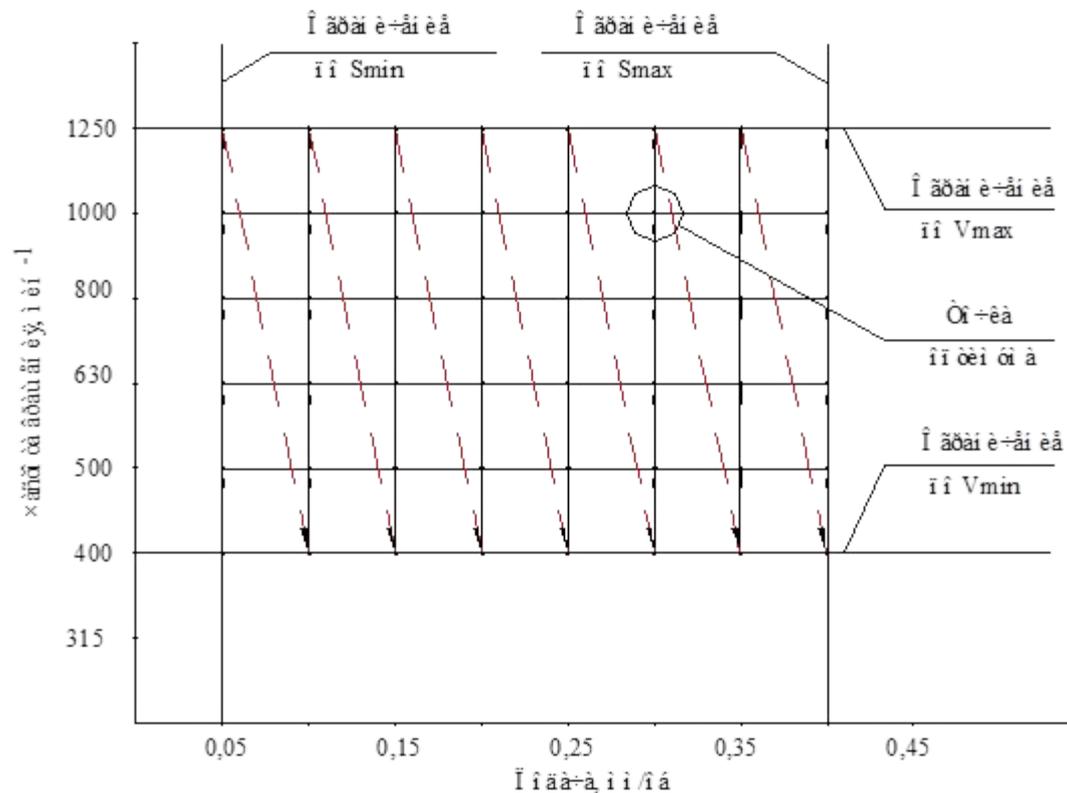
Параметрическая оптимизация технологических процессов

Выбор метода решения задачи и схема алгоритма оптимизации режима резания

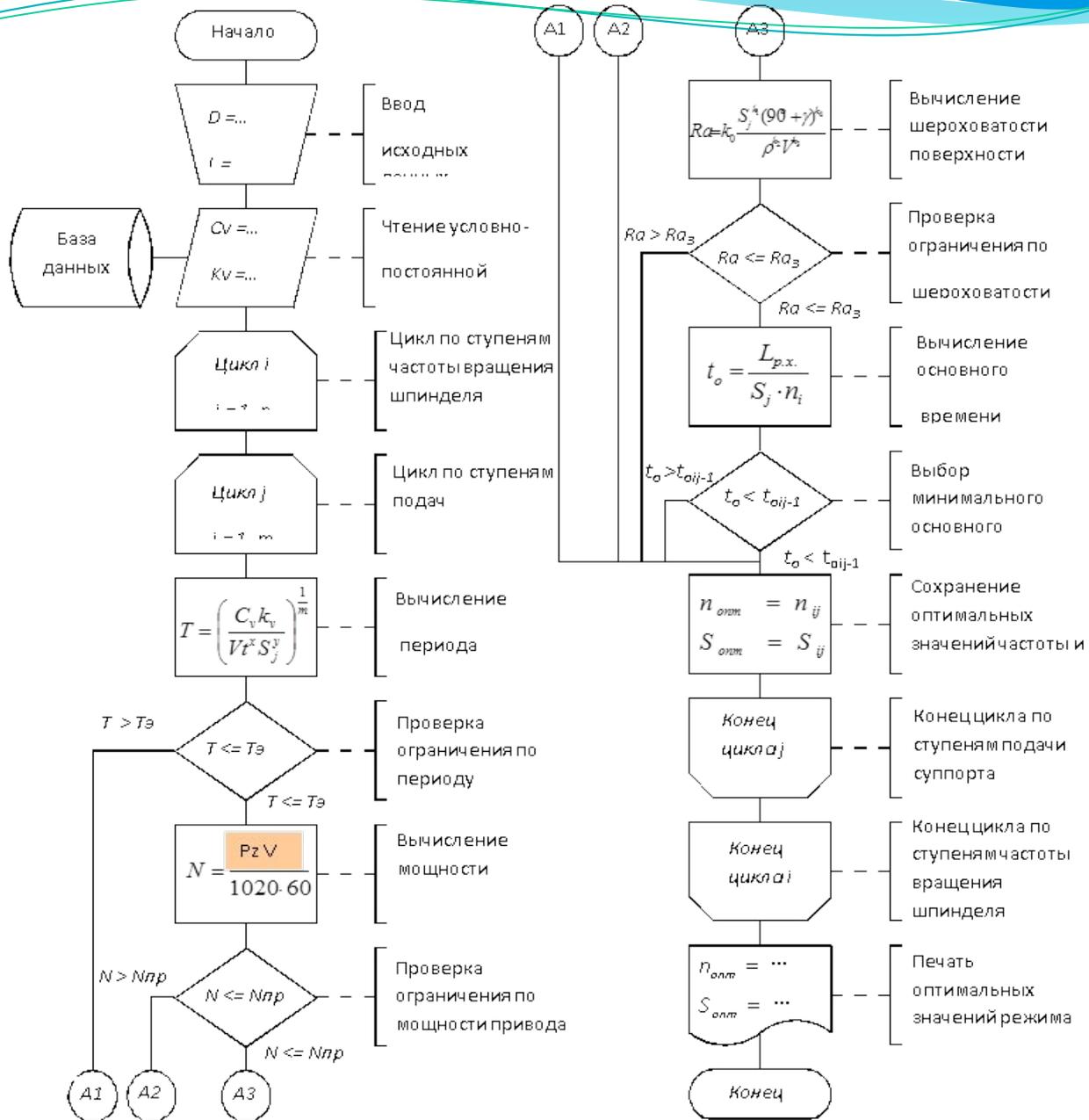
Учитывая перечисленные выше особенности функциональных моделей процессов резания можно предложить простой и эффективный метод решения задачи оптимизации режима резания, который заключается в обходе узлов пространственной сетки, образованной дискретными значениями ряда частот вращения шпинделя и подачи инструмента. При реализации этого метода в каждом узле сетки независимых переменных n_i и S_j вычисляется значение целевой функции и функций ограничений. Из всех возможных сочетаний n_i и S_j , удовлетворяющих наложенным ограничениям, выбирается то, которое обеспечивает минимум целевой функции.

Параметрическая оптимизация технологических процессов

Выбор метода решения задачи и схема алгоритма оптимизации режима резания



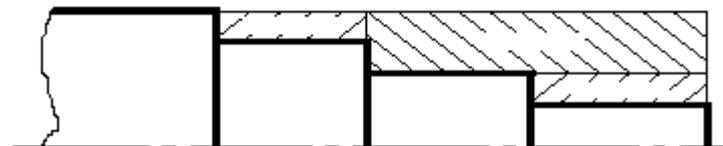
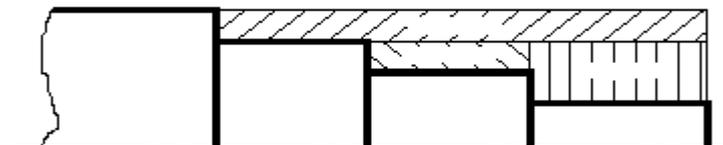
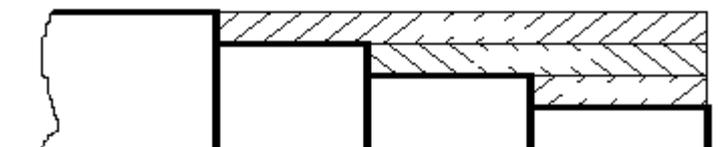
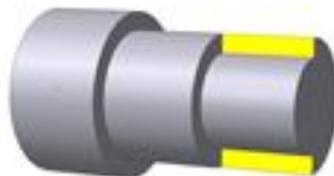
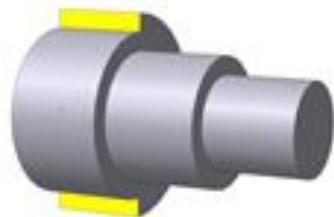
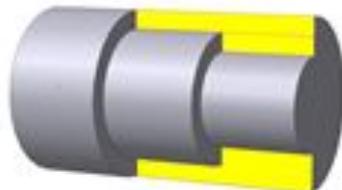
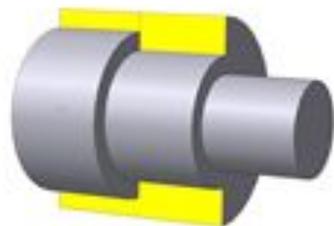
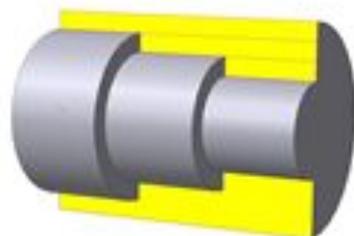
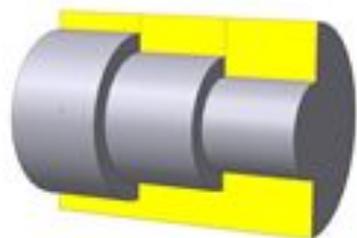
Геометрическая интерпретация метода поиска экстремума целевой функции на дискретном множестве независимых переменных



Структурная оптимизация технологических операций

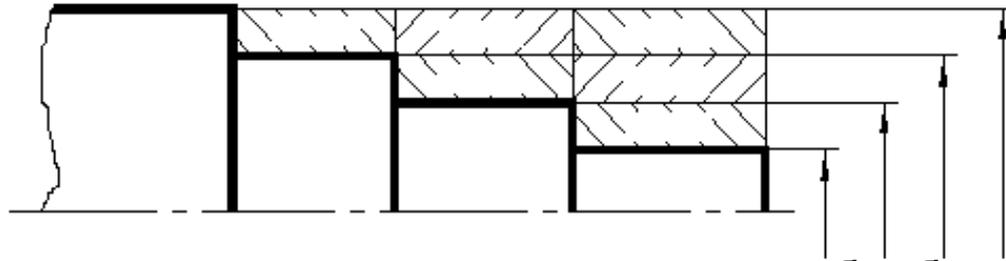
Для автоматизации проектирования и программирования технологических операций, выполняемых на станках с ЧПУ, создано большое количество CAM (Computer Aided Manufacturing) систем – T-Flex ЧПУ, SprutCAM, Cimatron и др. Эти автоматизированные системы проектирования позволяют на основе заданного технологическим программистом профиля заготовки, обрабатываемой поверхности, последовательности технологических переходов и их параметров автоматически определять траектории перемещения инструмента и программировать обработку детали. Но, в составе программного обеспечения этих систем отсутствуют процедуры структурной и параметрической оптимизации технологических операций. Назначение параметров технологических переходов выполняется пользователем и в значительной степени зависит от квалификации специалиста. При изготовлении деталей цилиндрической формы из проката (валы, зубчатые колеса, шкивы втулки и т.п.) имеется возможность повысить эффективность эксплуатации дорогостоящего автоматизированного оборудования с программным управлением и снизить затраты времени на программирование токарных операций за счет автоматизированной структурной и параметрической оптимизации токарных операций

Структурная оптимизация технологических операций



Структурная оптимизация технологических операций

Припуск, удаляемый в каждом из технологических переход, условно представляют состоящим из одной или нескольких таких элементарных частей



Все возможные варианты компоновки припуска, при обработке k -ой ступени задаются уравнением

$$P_{klm} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=k}^m Z_{ij} \quad \left| \begin{array}{l} l = 1, 2, \dots, k; \\ m = k, k + 1, \dots, n; \\ k = 1, 2, \dots, n. \end{array} \right.$$

где k - номер ступени;

l - номер крайней правой ступени, объединенной с k -ой припуском по длине;

m - номер ступени большего диаметра из ступеней, объединенных припуском по длине;

Структурная оптимизация технологических операций

Выбор метода решения задачи и схема алгоритма оптимизации режима резания

Общее число таких вариантов для всех ступеней вала, определенных по уравнению 1, составляет

$$W = \frac{n(n+1)(n+2)}{b}$$

где b – количество элементарных частей Z_{ij} на которые разделен напуск, удаляемый при точении.

Например, при обработке 3-х ступенчатого вала таких вариантов 10, но, с учетом того, что каждая из элементарных частей припуска Z_{ij} может в данную комбинацию P_{klm} только один раз, получаем пять сочетаний Z_{ij} , соответствующих пяти вариантам обработки.

Структурная оптимизация технологических операций

Для выявления оптимального варианта точения цилиндрических ступенчатых поверхностей необходимо выполнить расчет оперативного времени для всех пяти вариантов и выбрать тот, который обеспечивает наименьшее оперативное время T_{op} .

$$T_{op} = \sum_{i_p=1}^n (T_{o_{i_p}} + T_{в_{i_p}}),$$

где T_o - основное время;

$T_{в}$ - вспомогательное время;

i_p - номер технологического перехода.

Структурная оптимизация технологических операций

Основное время для перехода i_p определяется по уравнению

$$T_{o_{i_p}} = \frac{L_{v_{i_p}} + L_{i_p}}{N_{i_p} \cdot S_{i_p}} i_{i_p}$$

где $L_{v_{i_p}}$ - величина врезания инструмента;

L_{i_p} - длина снимаемого припуска;

N_{i_p} - частота вращения шпинделя;

S_{i_p} - продольная подача;

i_{i_p} - число рабочих ходов инструмента.

Структурная оптимизация технологических операций

Вспомогательное время, связанное с вспомогательными ходами суппорта

$$T_{в_{i_p}} = \frac{L_{i_p} + L_c}{V_{x.x.}}$$

где $V_{x.x.}$ - скорость ускоренных перемещений суппорта;
 L_c - расстояние от правого торца вала до точки смены инструмента.

·
·