

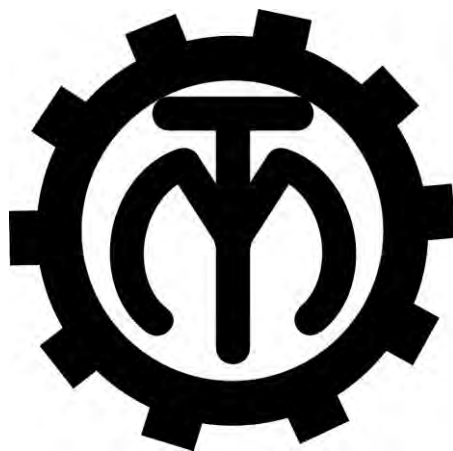
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технология машиностроения»

ДИПЛОМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

*Методические указания для студентов специальностей
1-36 01 01 «Технология машиностроения»,
1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и
производств»*

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ



Могилев 2014

УДК 621.01:658.012.011.56
ББК 34.5:32.965
О 62

Рекомендовано к опубликованию
Центром менеджмента качества образовательной деятельности
ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Одобрено кафедрой «Технология машиностроения» «23» апреля 2014 г.,
протокол № 10

Составитель доц. А. Н. Рязанцев

Рецензент канд. техн. наук, доц. И. В. Лесковец

Изложены методические основы параметрической оптимизации технологических процессов. Даны рекомендации по разработке математического, информационного и программного обеспечения автоматизированных проектных процедур параметрической оптимизации технологических процессов в дипломных проектах.

Учебное издание

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Ответственный за выпуск	А. В. Капитонов
Технический редактор	С. Н. Красовская
Компьютерная верстка	Е. С. Фитцова

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл.-печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 115 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 24.01.2014.
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский
университет», 2014



Содержание

1 Цель, место и содержание задачи оптимизации технологических процессов в дипломном проекте.....	4
2 Параметрическая оптимизация технологических процессов.....	5
3 Оптимизируемые параметры и критерии оптимизации.....	7
4 Ограничения на область поиска экстремума целевой функции.....	10
5 Функциональная модель процесса резания.....	14
6 Информационное обеспечение процедуры параметрической оптимизации.....	18
7 Методы решения задачи параметрической оптимизации.....	
8 Алгоритмизация решения задачи параметрической оптимизации.....	21
9 Программирование процедуры параметрической оптимизации.....	25
Список литературы.....	30
Приложение А.....	31



1 Цель, место и содержание задачи оптимизации технологических процессов в дипломном проекте

Основной целью методических указаний является систематизация и закрепление теоретических знаний и практических навыков в области оптимизации технологических процессов, полученных студентами во время обучения.

Поставленная цель достигается путем самостоятельной постановки студентами задачи параметрической оптимизации и разработки соответствующих автоматизированных проектных процедур проектирования в дипломном проекте.

Постановка задачи параметрической оптимизации и разработка автоматизированной проектной процедуры выполняется на этапе технологического проектирования, который связан с расчетом режимов резания. Разработку автоматизированных проектных процедур параметрической оптимизации рекомендуется выполнять для технологических переходов токарных, сверлильных или фрезерных операций.

Решение задачи параметрической оптимизации обеспечивает автоматизацию расчета режимов резания, что снижает трудоемкость проектирования и повышает качество технологической части дипломного проекта.

Раздел дипломного проекта «Параметрическая оптимизация технологического процесса» включает решение следующих задач, которые представляют собой соответствующие подразделы пояснительной записки:

- 1 Организационно-технические условия выполнения технологической операции.
- 2 Критерий оптимизации и состав оптимизируемых параметров.
- 3 Ограничения на область поиска экстремума целевой функции.
- 4 Функциональная модель процесса резания.
- 5 Информационное обеспечение проектной процедуры параметрической оптимизации.
- 6 Алгоритмизация и программирование проектной процедуры параметрической оптимизации.
- 7 Анализ результатов параметрической оптимизации технологического процесса.

Пример оформления раздела пояснительной записки «Параметрическая оптимизация технологического процесса» приведен в электронном виде в приложении к библиотеке типовых программ параметрической оптимизации технологических процессов, находящейся в фонде программного обеспечения учебного процесса кафедры «Технология машиностроения». Указанные типовые программы рекомендуется использовать для сокращения затрат времени на разработку оригинального информационного и программного обеспечения проектных процедур параметрической оптимизации технологических процессов.



2 Параметрическая оптимизация технологических процессов

Автоматизированное проектирование технологических процессов механической обработки резанием представляет собой совокупность процедур структурного синтеза и параметрической настройки технологических процессов.

Процедуры структурного синтеза решают задачи выбора технологического маршрута, средств технологического оснащения и содержания технологических операций. Процедуры структурного синтеза технологических процессов являются плохо формализованными задачами ввиду большого разнообразия объектов производства и организационно-технических условий на машиностроительных предприятиях.

Процедуры параметрической настройки решают задачи определения припусков, операционных размеров, расчета режимов резания, нормирования операций. Задачи параметрической настройки технологических процессов являются хорошо формализованными, и их решение может быть достаточно просто автоматизировано с использованием современных средств вычислительной техники.

При выполнении дипломного проекта рекомендуется автоматизировать решение одной из задач параметрической настройки технологических процессов – параметрическую оптимизацию технологических процессов, связанную с определением оптимальных режимов резания.

Оптимальным режимом резания является такое сочетание глубины, подачи и скорости резания, при котором механическая обработка заготовки выполняется наиболее экономично при соблюдении требований к точности и качеству обработанных поверхностей.

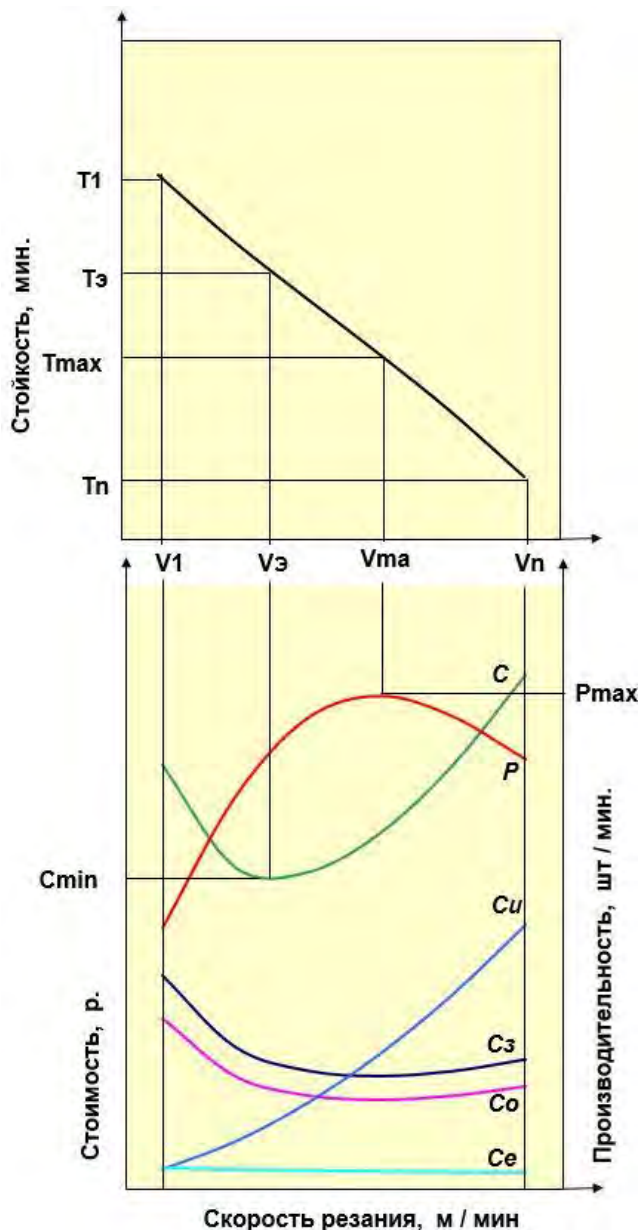


Рисунок 1 – Влияние скорости резания на технико-экономические показатели перехода технологической операции

На рисунке 1 в логарифмических координатах приведены кривые изменения стойкости T , затрат на инструмент C_i , эксплуатационных расходов на оборудование C_o , зарплаты основных производственных рабочих C_z , электроэнергии C_e и производительности P в зависимости от скорости резания V .

Путем сложения затрат на оборудование, инструмент, зарплату и электроэнергию получена кривая суммарных затрат C на механическую обработку резанием.

Из графика видно, что с ростом скорости резания растут расходы на инструмент C_i , т. к. стойкость инструмента T снижается. В то же время с ростом скорости резания V повышается производительность P , уменьшается трудоемкость изготовления детали и, как следствие, снижаются затраты на эксплуатацию металлорежущего оборудования C_o , зарплату C_z и электроэнергию C_e .

Точка минимума C_{\min} кривой суммарных затрат C соответствует экономически обоснованной скорости резания $V_{\text{э}}$ и периоду стойкости $T_{\text{э}}$. При дальнейшем увеличении скорости резания производительность P вначале увеличивается почти пропорционально скорости резания. Затем рост производительности замедляется, и она начнет падать. Снижение производительности связано с тем, что с уменьшением стойкости инструмента возрастает время простоев оборудования для смены затупившегося инструмента. Это обуславливает и дальнейший рост затрат на эксплуатацию оборудования, режущего инструмента и зарплату. Затраты на электроэнергию с увеличением скорости резания незначительно уменьшаются, что можно объяснить известным явлением – снижением силы резания при увеличении скорости резания.

На графике можно выделить точку максимальной производительности P_{\max} и соответствующую ей скорость резания V_{\max} . Работа на скоростях выше точки V_{\max} экономически нецелесообразна, т. к. не дает прироста производительности, но требует больших затрат.

Из графика также видно, что снижение скорости резания с целью повышения стойкости инструмента с экономической точки зрения не рационально, т. к. ведет к повышению суммарной стоимости обработки C , что равносильно снижению рентабельности и удлинению сроков окупаемости металлорежущего оборудования.

Работа на скоростях, близких к $V_{\text{э}}$, позволяет минимизировать издержки производства и снизить себестоимость механической обработки резанием.

Расчет оптимальных режимов резания представляет собой сложную технико-экономическую многофакторную вариационную задачу, решение которой наиболее эффективно реализуется с использованием ЭВМ и математических методов программирования.

Описание подходов к постановке и решению этой задачи изложено в учебниках, учебных пособиях и монографиях [1–7].



3 Оптимизируемые параметры и критерии оптимизации

Постановка задачи параметрической оптимизации заключается в определении оптимизируемых параметров, критерия оптимизации, целевой функции и состава ограничений на область поиска экстремума целевой функции при заданных организационно-технических условиях.

Для большинства видов обработки резанием оптимизируемыми параметрами могут являться: скорость резания, подача, глубина резания или количество рабочих ходов инструмента.

Конкретный набор оптимизируемых параметров зависит от характера обработки резанием. Например, при чистовом продольном точении, сверлении оптимизируемыми параметрами являются скорость резания и продольная подача, при черновом многопроходном точении – глубина резания, скорость резания и продольная подача, при нарезании резьбы – скорость резания и количество рабочих ходов инструмента. Таким образом, выбор состава оптимизируемых параметров определяется элементами режима резания того или иного вида обработки.

При решении задачи определения оптимальных режимов резания в качестве критерия оптимизации могут быть использованы технические и экономические критерии (рисунок 2).

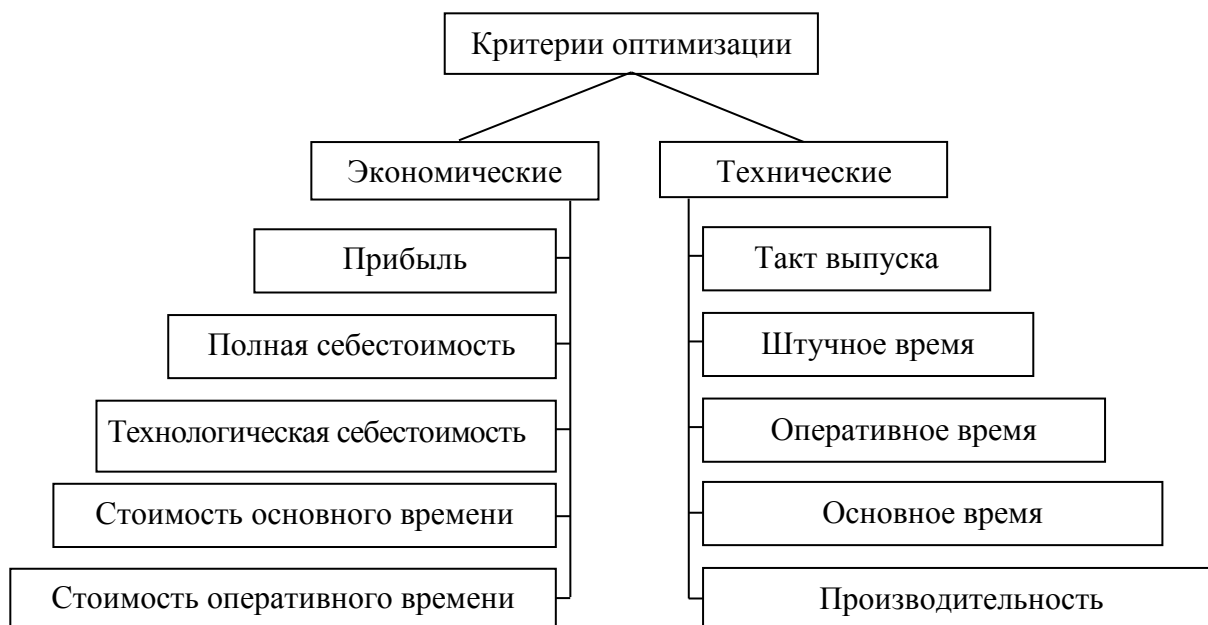


Рисунок 2 – Критерии оптимизации технологических процессов

Наиболее простыми для расчета являются технические критерии оптимизации, к которым относятся основное или оперативное время, связанное с выполнением перехода. Например, при известном экономически выгодном периоде стойкости инструмента в качестве критерия оптимизации режима чернового многопроходного точения может быть использовано основное время t_0 выполнения технологического перехода. В этом случае целевая функция будет иметь вид:

$$t_o = \frac{L_{p.x.}}{S_{mi}} \cdot i \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $L_{p.x.}$ – длина рабочего хода инструмента, мм;
 S_{mi} – минутная подача на i -м рабочем ходе инструмента, мм/мин;

i – количество рабочих ходов инструмента.

Несмотря на простоту, эта целевая функция имеет существенный недостаток, который заключается в том, что при решении задачи поиска минимума целевой функции (1) необходимо достаточно точно знать величину экономически выгодного периода стойкости режущего инструмента. В нормативах режимов резания величина экономически выгодного периода стойкости задается в достаточно широких пределах [8–12]. Это обстоятельство не позволяет с необходимой точностью определить оптимальные режимы резания. Поэтому этот вид критерия целесообразно использовать в тех случаях, когда экономически выгодный период стойкости режущего инструмента известен точно, например, установлен на основе экспериментальных исследований процесса резания.

Принимая во внимание весьма динамичное изменение цен на оборудование, технологическую оснастку, различные виды энергии и рабочую силу, наиболее объективными следует считать экономические критерии оптимизации. 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:

$$C_T = C_M + C_O + C_B + C_A + C_{ИН} + C_{ТО} + C_Э + C_H + C_P, \quad (2)$$

где C_M – затраты на основные материалы или стоимость заготовки;
 C_O – заработная плата основных производственных рабочих;
 C_B – заработная плата вспомогательных рабочих;
 C_A – затраты по амортизационным отчислениям на оборудование;
 $C_{ИН}$ – затраты на инструмент;
 $C_{ТО}$ – затраты на технологическую оснастку;
 $C_Э$ – затраты на технологическую энергию;
 C_H – затраты на настройку инструментов вне станка;
 C_P – затраты на ремонт оборудования.

Составляющие технологической себестоимости могут быть определены по методике, которая изложена в [13]. Причем определение каждой составляющей технологической себестоимости по указанной методике представляет собой достаточно громоздкую самостоятельную задачу.

Учитывая сложность решения этой задачи и то, что значительная часть затрат не зависит от режимов резания, при выполнении параметрической оптимизации можно использовать простой экономический критерий оптимизации – стоимость основного времени технологического пере-

хода C_{OT} р./мин. Этот критерий оптимизации отражает влияние режимов резания только на те затраты, которые непосредственно связаны с изменением режима резания.

$$C_{OT} = t_o \left(C_{ИН} + C_{Э} + \left(\frac{C_o + C_A}{60} \left(1 + \frac{t_{c.u.}}{T} \right) \right) \right) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где T – период стойкости инструмента;

$t_{c.u.}$ – время смены инструмента или грани режущей пластины, мин.

Стоимость основного времени технологического перехода отражает непосредственное влияние элементов режима резания на экономичность процесса обработки и в то же время не требует определения элементов затрат, таких как затраты на ремонт, технологическую оснастку и др., для которых отсутствуют достаточно строгие нормативы. Кроме того, в уравнении (3) учтены затраты на смену режущего инструмента, которые могут существенно влиять на стоимость основного времени при использовании дорогостоящего оборудования. Элементы затрат, входящие в уравнение (3), могут быть определены по следующим уравнениям.

Заработная плата основных производственных рабочих

$$C_o = T_q \cdot K_M \cdot (1 + \alpha) \cdot (1 + \beta), \quad (4)$$

где T_q – тарифная ставка при выполнении операции, р.;

K_M – коэффициент, учитывающий оплату основного рабочего при многостаночном обслуживании;

α – коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату;

β – коэффициент, учитывающий отчисления на социальные нужды.

Затраты по амортизационным отчислениям на оборудование

$$C_A = \frac{S_o \cdot H_A}{F_d}, \quad (5)$$

где S_o – первоначальная стоимость оборудования, р.;

H_A – годовая норма амортизационных отчислений на оборудование, рекомендуется 0,15–0,25;

F_d – действительный фонд времени работы оборудования, ч.

Затраты на инструмент

$$C_{ИН} = \frac{S_{ИН}}{T_{СТ} \cdot (K_{П} - 1)}, \quad (6)$$

где $S_{ИН}$ – цена инструмента, определяемая по каталогам предприя-

тий, фирм-поставщиков инструмента или на сайтах сети Интернет [14];

T_{CT} – период стойкости инструмента, мин;

K_{II} – число режущих граней инструмента со сменными многогранными пластинами (СМП) или число переточек режущей пластины инструмента до полного износа.

Затраты на технологическую энергию

$$C_{\mathcal{E}} = \frac{S_{\mathcal{E}} \cdot t_0 \cdot N_P}{60 \cdot \eta_{III}}, \quad (7)$$

где $S_{\mathcal{E}}$ – цена 1кВт·ч электроэнергии, р./(кВт·ч);

t_0 – основное время технологического перехода, мин;

η_{III} – КПД привода шпинделя станка;

N_P – мощность, затрачиваемая на резание, кВт.

4 Ограничения на область поиска экстремума целевой функции

После определения состава оптимизируемых параметров и целевой функции устанавливается состав ограничений, которые зависят от технических характеристик элементов технологической системы. На рисунке 3 показаны основные группы ограничений, которые целесообразно учитывать при постановке задачи параметрической оптимизации.



Рисунок 3 – Ограничения на область поиска экстремума целевой функции

Задание ограничений по диапазону регулирования скоростей вращения шпинделя может быть описано следующим образом.

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 записано в следующем виде:

$$n_i \in \{n_1, n_2, \dots, n_k\}, \quad (8)$$

где n_i – искомая оптимальная частота вращения шпинделя станка;
 k – количество ступеней частоты вращения шпинделя станка.

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

$$S_j \in \{S_1, S_2, \dots, S_m\}, \quad (9)$$

где S_j – искомая оптимальная подача станка;
 m – количество ступеней подач станка.

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

$$n_{\min} \leq n_i \leq n_{\max}, \quad (10)$$

$$S_{\min} \leq S_i \leq S_{\max}, \quad (11)$$

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

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

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

$$P_x \leq P_{n.n}, \quad (12)$$

где P_x – составляющая силы резания в направлении продольной подачи;

$P_{n.n}$ – усилие, допустимое механизмом продольной подачи станка.

При параметрической оптимизации технологических переходов сверления отверстий необходимо учитывать ограничение по осевому уси-



лию на шпиндель станка. Это ограничение может быть задано следующим образом:

$$P_y \leq P_o, \quad (13)$$

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

При предварительной обработке заготовок с большими глубинами резания и подачами необходимо учитывать ограничение по мощности привода шпинделя станка

$$N_p \leq N_{np} \cdot \eta, \quad (14)$$

где N_p – мощность, затрачиваемая на резание;
 N_{np} – мощность привода главного движения станка;
 η – КПД привода шпинделя станка.

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, если один из центров является поводковым, необходимо учитывать ограничение по предельно допустимому передаваемому крутящему моменту $M_{к.д.}$.

$$M_{к.р.} \leq M_{к.д.}, \quad (15)$$

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

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

$$n_i \leq n_{m.n.max}, \quad (16)$$

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

Другие ограничения по техническим характеристикам станочных приспособлений могут быть выявлены на основе анализа конструктивных особенностей приспособления, условий его эксплуатации, схемы базирования и закрепления заготовки.

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



Ограничение по периоду стойкости инструмента

$$T \leq T_{\text{э}}, \quad (17)$$

где T – период стойкости инструмента, который соответствует оптимальным режимам резания;

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

Это ограничение следует учитывать при использовании технических критериев оптимизации, например, основного или оперативного времени, или из других соображений, таких как одновременная замена многоинструментальной наладки для сокращения простоев дорогостоящего оборудования.

Для ограничения области поиска экстремума целевой функции целесообразно задание следующих ограничений.

Ограничение по скорости резания, при которой начинается процесс наростообразования,

$$V_i \leq V_n, \quad (18)$$

где V_i – оптимальное значение скорости резания;

V_n – скорость резания, при которой начинается процесс наростообразования.

Ограничение по скорости резания, соответствующей красностойкости инструментального материала,

$$V_i \leq V_k, \quad (19)$$

где V_k – скорость резания, соответствующая красностойкости инструментального материала.

Для исключения поломки инструмента необходимо учитывать ограничения, которые связаны с прочностью режущего инструмента. В большинстве случаев это ограничение может быть определено значением предельно допустимой подачи при заданной глубине резания:

$$S_i \leq S_{\text{доп}}, \quad (20)$$

где $S_{\text{доп}}$ – подача, допустимая прочностью режущего инструмента.

Аналогичным образом может быть задано подобное ограничение для других видов режущих инструментов, сверл, фрез и т. д. Приведенный выше состав ограничений не является исчерпывающим. В каждом отдельном случае с целью выявления дополнительных ограничений необходимо детально рассматривать технические характеристики инструментов и влияние режима резания на их работоспособность.



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 исключаящим изменение формы обрабатываемой поверхности сверх допустимых отклонений, является ограничение по величине составляющей силы резания P_y :

$$P_y \leq P_{дон}, \quad (21)$$

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

Другие ограничения подобного типа могут быть установлены на основе анализа особенностей конструкции детали и способа ее закрепления в станочном приспособлении.

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

$$Ra \leq Ra_{нов}, \quad (22)$$

где $Ra_{нов}$ – шероховатость обработанной поверхности.

Выше были рассмотрены основные ограничения, характерные для большинства задач параметрической оптимизации технологических операций. В других случаях могут быть заданы дополнительные ограничения с учетом технических характеристик конкретной технологической системы.

5 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 , подачи S и глубины резания t – на различные выходные параметры процесса резания при определенных организационно-технических условиях производства (входных параметрах).

Структурная схема функциональной модели для решения задачи параметрической оптимизации процесса резания представлена на рисунке 4.



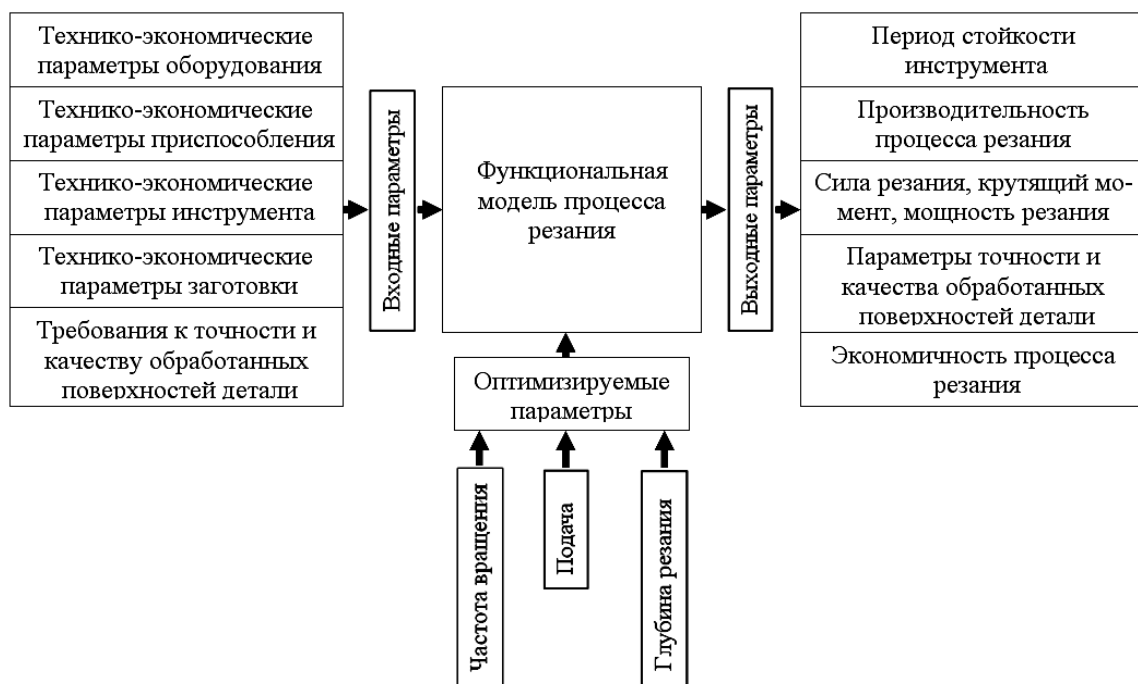


Рисунок 4 – Структурная схема функциональной модели для решения задачи параметрической оптимизации процесса резания

Комплекс входных параметров функциональной модели представляет собой множество технико-экономических показателей, которые характеризуют основные элементы технологической системы и оказывают влияние на производительность и экономичность обработки (таблица 1).

Таблица 1 – Технико-экономические показатели технологических систем, влияющие на экономичность процесса резания

Технико-экономические показатели	Элементы технологической системы			
	Станок	Приспособление	Инструмент	Деталь
Стоимость оборудования и СТО	+	+	+	
Срок службы оборудования и СТО	+	+	+	
Эксплуатационные расходы	+	+	+	
Мощность привода	+	+		
Диапазон скоростей подач	+	+	+	
Точность	+	+	+	+
Жесткость	+	+	+	+
Качество поверхности				+
Твердость, предел прочности				+
Вид и состояние заготовки				+
Стоимость энергоносителей	+	+		
Износостойкое покрытие			+	
Применение СОЖ			+	

Приведенные выше технико-экономические показатели технологической системы являются константами модели (постоянными) для конкретных организационно-технических условий производства.

Оптимизируемые параметры n , S , t относятся к независимым переменным модели и могут изменяться в заданном диапазоне, вызывая изменение выходных параметров.

Выходные параметры функциональной модели являются зависимыми переменными и отражают влияние входных и оптимизируемых параметров на технико-экономические показатели технологической операции. В общем случае к ним относятся скорость резания V , стойкость режущего инструмента T , составляющие силы резания P_x , P_y , P_z , мощность, затрачиваемая на резание N_p , крутящий момент $M_{кр}$, шероховатость обработанной поверхности R_a , точность формы и взаимного положения обрабатываемых поверхностей Δ_ϕ , упругие деформации элементов технологической системы и др.

Для составления функциональной модели процесса резания могут быть использованы уравнения, которые приведены в [7–11] или получены экспериментальным путем.

Например, используя уравнения, приведенные в [10], можно составить функциональную математическую модель процесса резания, которая будет отражать влияние входных параметров и параметров оптимизации на выходные параметры. Ниже приведены наиболее характерные для функциональных моделей процессов резания уравнения.

Уравнение для расчета скорости резания V определяет влияние оптимизируемого параметра – частоты вращения шпинделя:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n_i}{1000}, \quad (23)$$

где D – диаметр обрабатываемой поверхности.

Уравнение для расчета периода стойкости инструмента T определяет влияние оптимизируемых параметров n , S , t :

$$T = \left(\frac{C_v \cdot k_v}{V \cdot t^x \cdot S_j^y} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (24)$$

где C_v , K_v , x , y , m – нормативные коэффициенты и показатели степеней для вычисления скорости резания для заданных условий обработки [10];

t – глубина резания, определяемая величиной операционного припуска.



Главная составляющая P_z силы резания при продольном точении определяется как

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot S_j^{y_p} \cdot V^{n_p} \cdot k_p, \quad (25)$$

где C_p , k_p , x_p , y_p , n_p – коэффициенты и показатели степеней в формулах для вычисления скорости резания и силы резания [8, 9, 11, 12].

Мощность резания при продольном точении

$$N = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60}. \quad (26)$$

Шероховатость обработанной поверхности

$$R_a = k_0 \frac{S_j^{k_1} \cdot (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{\rho^{k_2} \cdot V^{k_3}}, \quad (27)$$

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.

При точении с большими глубинами резания консольно закрепленной в токарном патроне заготовки допустимую упругую деформацию Δ_{don} можно определить по уравнению

$$\Delta_{don} = \frac{P_y \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I}, \quad (28)$$

где P_y – составляющая силы резания;

E – модуль упругости материала заготовки;

I – момент инерции поперечного сечения заготовки;

l – вылет заготовки из кулачков токарного патрона.

При установке в патроне с поджатием задним центром

$$\Delta_{don} = \frac{P_y \cdot l^3}{100 \cdot E \cdot I}, \quad (29)$$

где L – длина заготовки.

При установке в центрах в любом сечении, расположенном на расстоянии x от переднего центра,

$$\Delta_{don} = \frac{P_{don} \cdot x^2 \cdot (L - x)^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot L}. \quad (30)$$



Приведенные выше уравнения являются примерами элементов функциональных моделей. Реальный их состав достаточно обширен [7–11], и в каждом случае составления функциональной математической модели он должен быть конкретизирован с учетом особенности условий выполнения технологических операций.

6 Информационное обеспечение процедуры параметрической оптимизации

Информационное обеспечение процедуры параметрической оптимизации представляет собой переменную и условно-постоянную информацию. Содержание информационного обеспечения процедуры параметрической оптимизации технологических процессов в общем случае можно представить в виде схемы, показанной на рисунке 5.

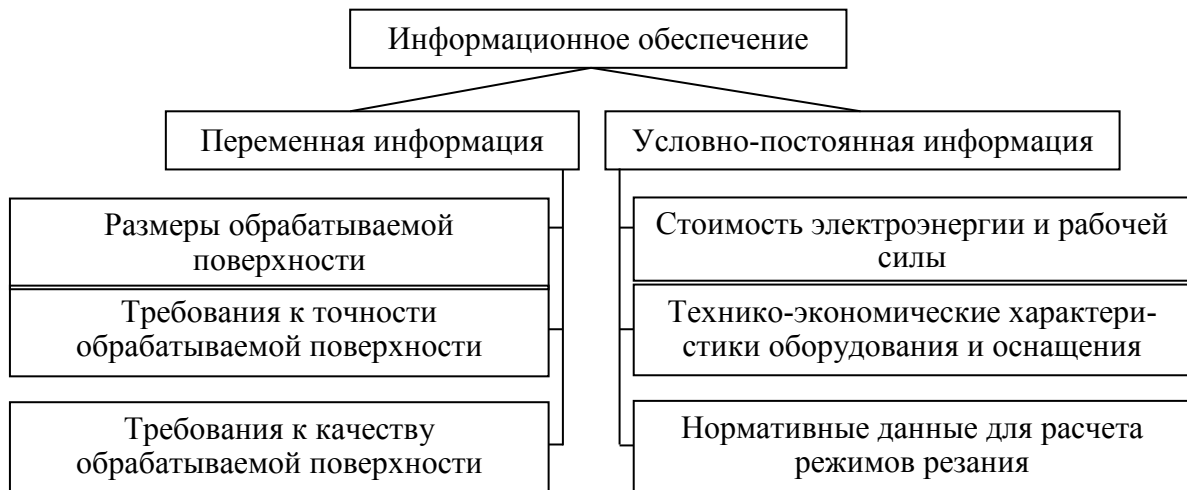


Рисунок 5 – Информационное обеспечение процедуры параметрической оптимизации технологических процессов

Переменная информация содержит сведения о параметрах обрабатываемых поверхностей и изменяется при обработке различных деталей.

Условно-постоянная информация служит для определения значений правых частей ограничений, записанных в виде неравенств или равенств, а также для задания численных значений переменных уравнений, входящих в состав функциональной модели процесса резания.

В САПР технологических процессов условно-постоянная информация размещается в таблицах базы данных, примеры которых приведены в таблицах 2–7.

Таблица 2 – Справочник металлорежущих станков

Код станка	Код группы станков	Модель станка	Мощность привода, кВт	Способ регулирования частоты вращения шпинделя	n_{\min} , об/мин	n_{\max} , мм/мин	Способ регулирования привода подачи	S_{\min} , мм/мин	S_{\max} , мм/мин	Максимальная скорость быстрых перемещений, мм/мин	Усилие, допустимое механизмом продольной подачи, Н
1	1	ГС1750Ф3С1	17	Бесступенчатый	10	5000	Бесступенчатый	0,01	5600	40000	8000

Таблица 3 – Справочник станочных приспособлений

Код приспособления	Код группы приспособлений	Обозначение	Наименование	ГОСТ	Минимальный диаметр закрепляемой заготовки	Максимальный диаметр закрепляемой заготовки	Предельно допустимая частота вращения
1	1	7002-0073-2-1	Патрон	24351-80	10	200	1000

Таблица 4 – Справочник режущих инструментов

Код инструмента	Код группы инструментов	Обозначение	Наименование	ГОСТ	Высота державки	Ширина державки	Допустимая глубина резания	Предельно допустимая подача	Экономически выгодный период стойкости	Главный угол в плане	Радиус скругления вершины	Главный передний угол	Главный задний угол
1	1	2101-0647	Резец	20872-80	25	25	4	1,5	20	93	1,0	10	15

Таблица 5 – Справочник нормативов для расчета скорости резания

Код группы инструментов	Код инструментального материала	Код группы обрабатываемого материала	Коэффициент K_c	Показатель степени n_v	Коэффициент K_{nv}	Коэффициент K_{nv}	Коэффициент C_v	Показатель степени x_v	Показатель степени y_v	Показатель степени m_v	Коэффициент $K_{\phi v}$	Коэффициент $K_{\phi v}$	Коэффициент $K_{\tau c}$
1	2	4	0,95	1,0	1,0	1,0	340,0	0,15	0,45	0,2	0,7	0,97	1,0



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_{sp}	Коэффициент K_{sp}	Коэффициент K_{sp}	Коэффициент K_{sp}	Коэффициент C_p	Показатель степени x_p	Показатель степени y_p	Показатель степени n_p
1	2	4	0,95	1,0	1,0	1,0	1,0	300	1,0	0,75	-0,15

Таблица 7 – Справочник нормативных данных для расчета шероховатости обработанной поверхности R_a

Код группы технологических переходов	Код инструментального материала	Код обрабатываемого материала	Коэффициент k_0	Показатель степени k_1	Показатель степени k_2	Показатель степени k_3	Показатель степени k_4
1	2	11	37,0	0,85	0,65	0,36	0,15

7 Методы решения задачи параметрической оптимизации

Анализ уравнений (23)–(30), которые входят в состав функциональных моделей различных процессов резания, показывает, что определение оптимальных режимов резания представляет собой задачу нелинейного математического программирования. Это связано с тем, что большинство уравнений, входящих 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 и 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 с ограничениями [7].

Учитывая особенности функциональных моделей процессов резания и небольшую размерность задачи, можно использовать метод решения задачи поиска экстремума целевой функции, который заключается в обходе узлов пространственной сетки, образованной дискретными значениями оптимизируемых параметров n_i и S_j . При реализации этого метода в каждом узле сетки независимых переменных n_i и S_j вычисляется значение целевой функции и функций, связанных с ограничениями. Из всех возможных сочетаний n_i и S_j , удовлетворяющих наложенным ограничениям, выбирается то, которое обеспечивает минимум целевой функции. Геометрическая интерпретация этого метода приведена на рисунке 6.

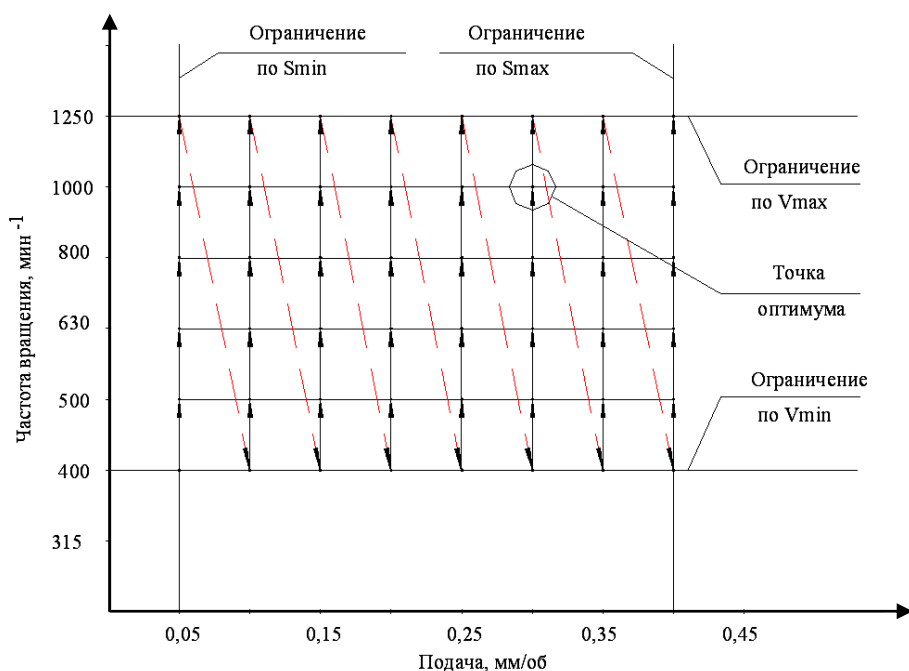


Рисунок 6 – Геометрическая интерпретация метода поиска экстремума целевой функции с ограничением на дискретном множестве независимых переменных

При небольшом количестве оптимизируемых параметров и ограничений этот метод является универсальным и абсолютно надежным, а при его реализации на современных персональных ЭВМ решение задачи выполняется за десятые доли секунды.

8 Алгоритмизация решения задачи параметрической оптимизации

На основе выбранного метода поиска экстремума целевой функции, особенностей математической модели процесса резания и состава ограничений может быть составлен алгоритм оптимизации режима резания.

Схема алгоритма выполняется в соответствии с ГОСТ 19.701-90 (ИСО 5807-85) ЕСПД *Схемы алгоритмов, программ, данных и систем.*

Схемы алгоритмов, программ, данных и систем состоят из имеющих заданное значение символов, краткого пояснительного текста и соединяющих линий.

Схема алгоритма включает:

- символы данных (символы данных могут также указывать вид носителя данных);
- символы процесса, который следует выполнить над данными (символы процесса могут также указывать функции, выполняемые вычислительной машиной);
- символы линий, указывающих потоки данных между процессами и (или) носителями данных;
- специальные символы, используемые для облегчения написания и чтения схемы.

На рисунке 7 приведены символы, наиболее часто используемые при составлении схем алгоритмов программ.

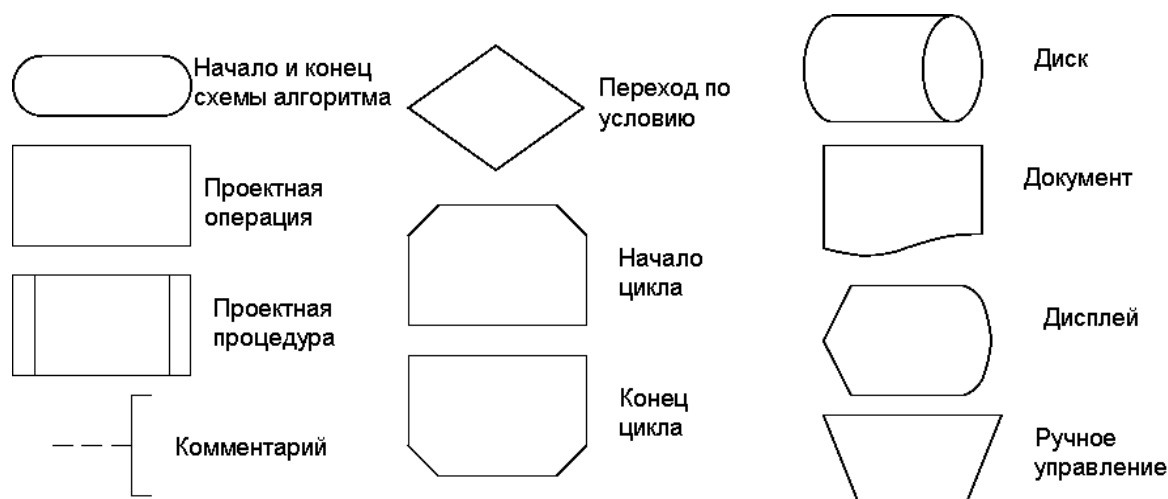


Рисунок 7 – Примеры изображений символов на схемах алгоритмов

Схемы алгоритмов могут использоваться на различных уровнях детализации, причем число уровней зависит от размеров и сложности задачи обработки данных. Уровень детализации должен быть таким, чтобы различные части и взаимосвязь между ними были понятны в целом. На рисунках 8 и 9 приведены примеры схем алгоритмов для различных условий параметрической оптимизации.

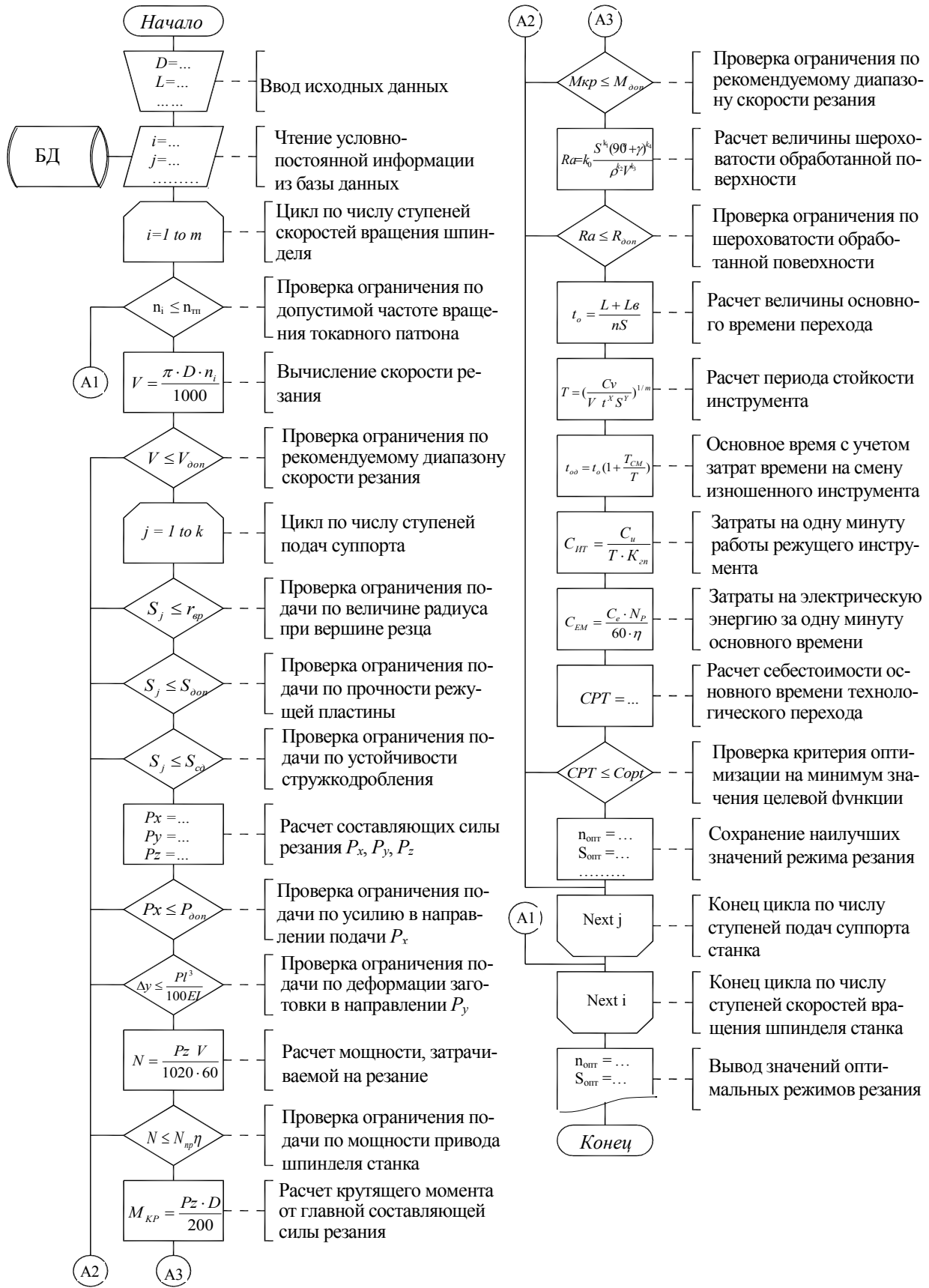


Рисунок 8 – Схема алгоритма параметрической оптимизации переходов продольного точения на станке со ступенчатым регулированием скорости вращения шпинделя и подачи



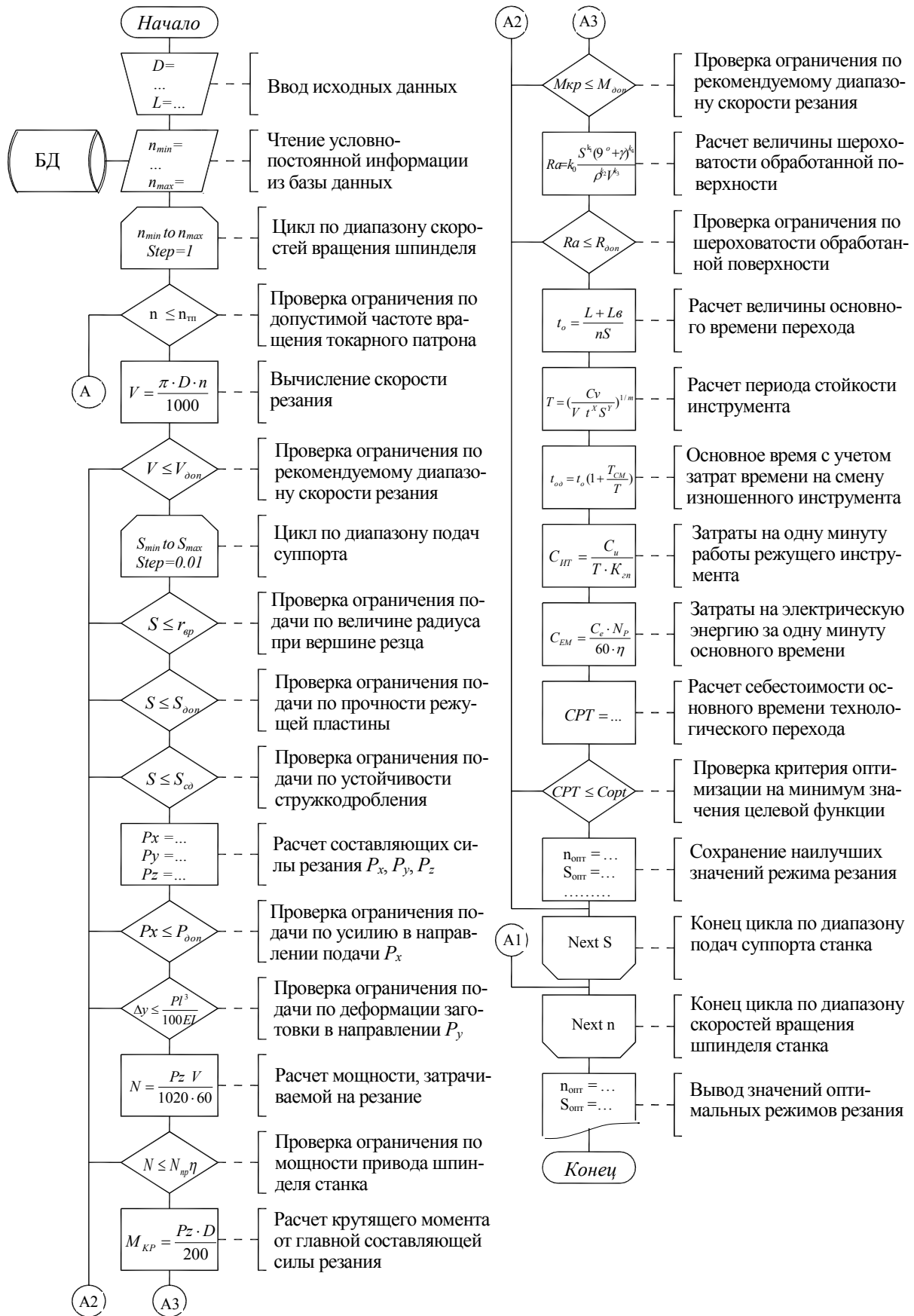


Рисунок 9 – Схема алгоритма оптимизации режима продольного точения на станке с бесступенчатым регулированием скорости вращения шпинделя и подачи



9 Программирование процедуры параметрической оптимизации

При выполнении дипломного проекта программирование процедуры оптимизации режимов резания для различных способов механической обработки резанием может быть реализовано средствами табличного процессора Microsoft Excel, имеющего интегрированную систему программирования VBA (Visual Basic for Application).

Для программирования задачи оптимизации необходимо на первом листе книги создать форму для ввода исходных данных. Образец формы приведен на рисунке 10.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Параметрическая оптимизация токарной операции														
2	<u>Регулирование частоты вращения шпинделя бесступенчатое</u>														
3	<u>Регулирование подачи суппорта бесступенчатое</u>														
4															
5	Иванов И.И. гр.ТМ-091 Дата: 05.05.2014														
6															
7	Исходные данные														
8															
9	Номер операции		015 Токарная с ЧПУ Установы А и Б												
10	Характер обработки		Черновая , продольное точение												
11	Обрабатываемый материал		Сталь 40Х												
12	Вид заготовки		Прокат	Диаметр	100	Длина	600	Закрепление	В патроне						
13	Количество переходов		12												
14	Номер перехода		2	4	6	8	9	11	14	17	20	23	26	29	
15	Диаметр поверхности, мм		41	51	61	71	81	91	41	50	60	70	80	90	
16	Длина поверхности, мм		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
17	Глубина резания, мм		3	3	3	3	3	3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
18	Подача (нормативная), мм/об		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	0,2	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	
19	Врезание и перебеги, мм.		2	2	2	2	2	2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
20	Шероховатость Ra, мкм		12	12	12	12	12	12	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	

Рисунок 10 – Образец формы для ввода исходных данных

Для запуска программы оптимизации в форму необходимо добавить элемент управления «Кнопка» с названием «Пуск». Операция вставки кнопки управления выполняется в режиме конструктора . После вставки кнопки следует выполнить команду «Свойства» из контекстного меню выбранного объекта и задать имя кнопки «Пуск», а при необходимости изменить размеры изображения кнопки.

В другой части листа создается форма для задания ограничений на область поиска экстремума целевой функции (рисунок 11). В третьей области листа создается форма для вывода результатов оптимизации (рисунок 12). В четвертой части листа создается форма для ввода данных, которые были рассчитаны по нормативам и служат для оценки эффективности оптимизации (рисунок 13). В пятой и шестой частях листа электронной таблицы создаются формулы и гистограммы, которые наглядно демон-

стрируют эффективность параметрической оптимизации технологической операции (рисунок 14).

22	Ограничения на область поиска экстремума целевой функции	
23		
24	1 Ограничения по техническим характеристикам станка	
25	Допустимое усилие в направлении подачи инструмента	8000 Н
26	Ограничение по мощности привода шпинделя станка	22 кВт
27	2 Ограничение по техническим характеристикам станочного приспособления	
28	Предельно допустимая частота вращения токарного патрона	3500 об/мин
29	Предельный допустимый передаваемый крутящий момент	1000 Н*м
30	3 Ограничение по прочности режущей пластины	
31	Максимальная допустимая глубина резания	4 мм
32	Максимальная допустимая подача	2,5 мм/об
33	4 Ограничения по условиям обеспечения устойчивого стружкодробления	
34	Верхняя граница по глубине резания	4 мм
35	Нижняя граница по глубине резания	0,1 мм
36	Нижняя граница по подаче	0,1 мм/об
37	Верхняя граница по подаче	1,5 мм/об
38	5 Ограничения по величине допустимых упругих деформаций заготовки	
39	Допустимая деформация в направлении перпендикулярном подаче	0,010 мм
40	6 Ограничения по допустимому диапазону скоростей резания	
41	Нижняя граница	50 м/мин
42	Верхняя граница	350 м/мин

Рисунок 11 – Образец формы для задания ограничений на область поиска экстремума целевой функции

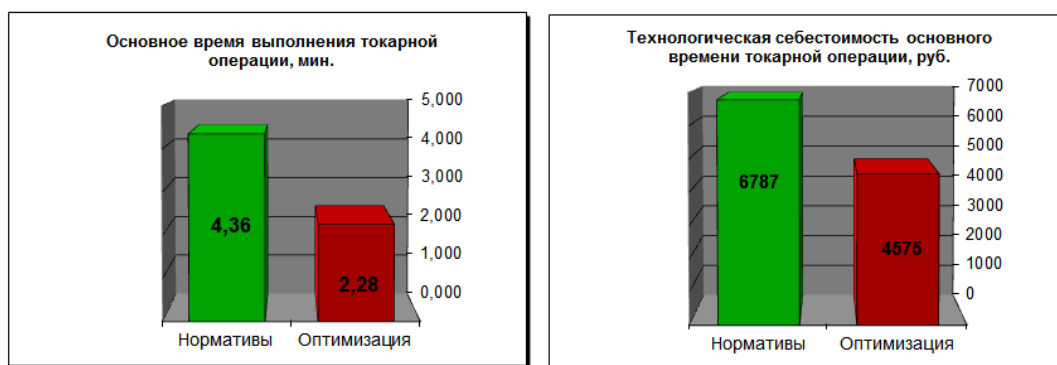
S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG
Результаты параметрической оптимизации токарной операции														
Оптимальные режимы резания														
Скорость резания, м/мин	171	171	172	172	170	171	312	311	311	312	311	311	311	311
Частота вращения, об/мин	1330	1070	900	770	670	600	2420	1980	1650	1420	1240	1100		
Подача, мм/об	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Подача, мм/мин	1184	952	801	685	596	534	653	535	446	383	335	297		
Период стойкости, мин	19,5	19,5	19,1	19,4	19,8	19,4	12,7	12,7	12,7	12,6	12,7	12,7		
Шероховатость, Ra мкм	8,54	8,53	8,52	8,53	8,55	8,53	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50		
Мощность, кВт	12,5	12,5	12,6	12,5	12,5	12,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4		
Сила резания Pz, Н	4418	4417	4413	4416	4421	4417	275	275	275	275	275	275		
Основное время, мин	0,08	0,11	0,12	0,15	0,17	0,19	0,15	0,19	0,22	0,26	0,30	0,34		
Себестоимость перехода, р.	159	198	236	275	314	353	319	389	466	545	622	700		

Рисунок 12 – Образец формы для вывода результатов оптимизации

Нормативные режимы резания												
Скорость резания, м/мин	161	156	153	150	147	147	252	252	252	252	252	252
Частота вращения, об/мин	1247	976	797	671	578	514	1955	1603	1336	1145	1002	890
Подача, мм/об	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Подача, мм/мин	624	585	558	537	520	463	293	240	200	172	150	134
Период стойкости, мин	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Шероховатость Ra, мкм	5,35	6,31	7,25	8,18	9,10	9,10	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64
Сила резания Pz, Н	2933	3376	3803	4216	4618	4618	185	185	185	185	185	185
Мощность, кВт	7,7	8,6	9,5	10,3	11,1	11,1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Основное время, мин	0,16	0,17	0,18	0,19	0,19	0,22	0,34	0,42	0,50	0,58	0,67	0,75
Себестоимость перехода, р.	258	277	292	306	317	356	522	637	764	892	1019	1146

Рисунок 13 – Образец формы для ввода данных, которые были рассчитаны по нормативам и служат для оценки эффективности оптимизации





Показатели эффективности параметрической оптимизации токарной операции

Общее сокращение основного времени токарной операции		91,45 %
Сокращение основного времени при годовом объеме выпуска	1000 шт	34,69 час
Снижение технологической себестоимости основного времени		48,35 %
Снижение себестоимости основного времени на годовом объеме выпуска		2212191 руб

Рисунок 14 – Образец формы для оценки эффективности параметрической оптимизации технологической операции

Информационное обеспечение, которое необходимо для вычисления значений фазовых переменных функциональной модели, размещается на других листах книги Excel. Пример создания таблиц базы данных на листе электронной таблицы приведен на рисунке 15.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
2	База данных нормативов для расчета режима продольного точения																	
4	Справочник нормативных данных для расчета скорости резания V																	
5																		
6	Номер записи	Обрабатываемый материал	Предел прочности стали, МПа или НВ для чугунов и цветных сплавов	Инструментальный материал	Рекомендуемый нормативный период стойкости инструмента T, мин	Коэффициент K _T	Показатель степени m _T	Коэффициент K _{TZ}	Коэффициент K _{Tφ}	Коэффициент S _{γтаб}	Показатель степени m _γ	Показатель степени m _φ	Показатель степени m _{γφ}	Коэффициент K _φ	Коэффициент K _{φγ}	Коэффициент K _{φс}	Коэффициент, учитывающий использование СОЖ K _с	Коэффициент, учитывающий наличие износостойких покрытий режущей пластины K _{из}
7	1	Сталь 40X	980	T15K6	30	0,95	1,00	0,9	1,00	350	0,15	0,15	0,35	0,7	1	1	1,4	2,5
8	Коэффициент	K _{Mv} = 0,727				Общий поправочный коэффициент на скорость резания										K _v = 1,60		
9						Новое значение скоростного коэффициента C _v = C _{vтаб} *K _v										C _v = 561,09		

Рисунок 15 – Образец таблицы базы данных

Для создания текста программы в режиме «Конструктор» из контекстного меню объекта кнопка «Пуск» командой «Исходный текст» открывается окно редактора интегрированной системы программирования Visual Basic for Application, подготовленное для ввода исходного текста программы.

Программу оптимизации условно можно разделить на три основные части: формирование исходных данных, вычислительная часть и вывод результатов оптимизации.

Формирование исходных данных выполняется чтением данных из ячеек таблиц базы данных, созданных на листах электронной таблицы. На рисунке 16 показан пример записи операторов чтения содержимого ячеек таблицы базы данных, которая приведена на рисунке 15.

```
'КОЭФФИЦИЕНТЫ И ПОКАЗАТЕЛИ СТЕПЕНЕЙ В УРАВНЕНИИ РАСЧЕТА ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ

Cv = Worksheets("БД").Range("O9").Value
Xv = Worksheets("БД").Range("K7").Value
Yv = Worksheets("БД").Range("L7").Value
Mv = Worksheets("БД").Range("M7").Value
```

Рисунок 16 – Пример чтения содержимого ячеек таблицы базы данных

```
For p = 4 To pr + 3 'Цикл по количеству оптимизируемых переходов
  D = Worksheets("ОПТБСР").Cells(15, p).Value ' Диаметр обрабатываемой поверхности
  L = Worksheets("ОПТБСР").Cells(16, p).Value ' Длина обрабатываемой поверхности
  TR = Worksheets("ОПТБСР").Cells(17, p).Value ' Глубина резания
  SN = Worksheets("ОПТБСР").Cells(18, p).Value ' Подача (нормативная), мм/об
  -----
For n = nmin To nmax Step 10 ' Цикл по частоте вращения шпинделя с шагом 10 об/мин
  ' Проверка ограничения по предельной допустимой частоте вращения токарного патрона
  If n > Worksheets("ОПТБСР").Range("L28").Value Then GoTo M2
  ' Расчет скорости резания в м/мин
  V = 3.14 * D * n / 1000
  ' Проверка ограничений по рекомендуемому диапазону скорости резания
  If V > Worksheets("ОПТБСР").Range("I42").Value Then GoTo M2
  If V < Worksheets("ОПТБСР").Range("I41").Value Then GoTo M2
  -----
For S = Smin To Smax Step 0.01 ' Цикл по продольной подаче суппорта с шагом 0,01 мм/об
  ' Проверка ограничения подачи по величине радиуса скругления при вершине резца
  If S > 0.9 * Rv Then GoTo M1
  ' Проверка ограничений по прочности режущей пластины
  If S > Worksheets("ОПТБСР").Range("I32").Value Then GoTo M1
  ' Проверка ограничений по условиям обеспечения устойчивого стружкодробления
  If S < Worksheets("ОПТБСР").Range("I36").Value Then GoTo M1
  If S > Worksheets("ОПТБСР").Range("I37").Value Then GoTo M1
  ' Расчет составляющих силы резания Px, Py, Pz в кгс.
  PX = Crx * TR ^ Xrx * S ^ Yrx * V ^ Nrx
  -----
  ' Составляющие технологической себестоимости основного времени перехода
  Cao = Todij * Ca / 60# ' Затраты на оборудование
  Coo = Todij * Co / 60# ' Затраты на зарплату
  Cino = Cin * Toij ' Затраты на инструмент
  Ceo = Ce * Toij ' Затраты на электроэнергию
M1:
  Next S ' Конец цикла по ступеням подач станка
M2:
  Next n ' Конец цикла по ступеням скоростей шпинделя станка
```

Рисунок 17 – Пример организации вычислительной части программы

Вычислительная часть программы представляет собой три вложенных цикла, в которых выполняется расчет фазовых переменных и проверка ограничений. Первый цикл *For p = 4 To pr + 3* обеспечивает выбор данных из ячеек электронной таблицы (рисунок 10) по переходам технологической операции. Вторым вложенным циклом *For n = nmin To nmax Step 1* обеспечивается изменение частоты вращения шпинделя с заданным шагом и в заданном диапазоне. Третьим вложенным циклом *For S = Smin To Smax Step 0.01* обеспечивается изменение подачи суппорта с заданным шагом и в заданном диапазоне. При оптимизации технологических операций, выполняемых на станках со ступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя и подачи суппорта, операторы цикла могут быть записаны в следующем виде: цикл по ступеням частоты вращения шпинделя *For i = 0 To m - 1*, цикл по ступеням продольных подач суппорта *For j = 0 To k - 1*.

Фрагмент программы, иллюстрирующий организацию вычислительной части программы, приведен на рисунке 17.

Вывод результатов оптимизации выполняется в форме, приведенной на рисунке 12. Пример этой части программы показан на рисунке 18.

```
'ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТИМИЗАЦИИ
Worksheets("ОПТБСР").Cells(3, p + 18).Value = Vopt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(4, p + 18).Value = Nopt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(5, p + 18).Value = Sopt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(6, p + 18).Value = Sopt * Nopt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(7, p + 18).Value = Topt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(8, p + 18).Value = Raopt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(9, p + 18).Value = NRopt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(10, p + 18).Value = Pzopt * 9.87
Worksheets("ОПТБСР").Cells(11, p + 18).Value = Toopt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(12, p + 18).Value = Coopt
Caos = Caos + Cao      ' Затраты на оборудование (сумма по переходам)
Coos = Coos + Coo      ' Затраты на зарплату (сумма по переходам)
Cinos = Cinos + Cino   ' Затраты на инструмент (сумма по переходам)
Ceos = Ceos + Ceo      ' Затраты на электроэнергию (сумма по переходам)
Next p      ' Конец цикла по технологическим переходам операции
' Вывод данных для построения диаграммы
Worksheets("ОПТБСР").Range("AI27").Value = Caos
Worksheets("ОПТБСР").Range("AI28").Value = Coos
Worksheets("ОПТБСР").Range("AI29").Value = Cinos
Worksheets("ОПТБСР").Range("AI30").Value = Ceos
End Sub
```

Рисунок 18 – Фрагмент программы с операторами вывода результатов оптимизации

Полные тексты программ параметрической оптимизации приведены в приложении А.

Для сокращения затрат времени на составление программы можно воспользоваться библиотекой типовых программ параметрической оптимизации, имеющихся в фонде программ кафедры.

Список литературы

- 1 **Кондаков, А. И.** САПР технологических процессов : учебник / А. И. Кондаков. – М. : Академия, 2007. – 272 с.
- 2 Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов / Под ред. С. Н. Корчака. – М.: Машиностроение, 1988. – 352 с.
- 3 **Аверченков, В. И.** САПР технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов: учеб. пособие для вузов / В. И. Аверченков, И. А. Каштальян, А. П. Пархутик. – Минск: Выш. шк., 1993. – 288 с.
- 4 **Рыжов, Э. В.** Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э. В. Рыжов, В. И Аверченков. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.
- 5 **Рязанцев, А. Н.** Автоматизация проектирования технологических процессов. Сборник задач : учеб. пособие / А. Н. Рязанцев, А. А. Жолобов. – Минск: Дизайн ПРО, 1997. – 121 с.
- 6 **Старков, В. К.** Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
- 7 **Якобс, Г. Ю.** Оптимизация резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации / Г. Ю. Якобс, Э. Якоб, Д. Кохан. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
- 8 Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. М. Дальского [и др.] – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 1. – 912 с.
- 9 Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. М. Дальского [и др.] – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 2. – 698 с.
- 10 Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 1. – 656 с.: ил.
- 11 Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.: ил.
- 12 Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. – М.: Экономика, 1990. – Ч. 2. – 473 с.
- 13 Расчёты экономической эффективности новой техники: справочник / Под общ. ред. К. М. Великанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение; Ленингр. отд-ние, 1990. – 448 с.
- 14 Мир Станочника – сайт официального технического дилера металлорежущего инструмента Sandvik Coromant Россия, Сандвик – МКТС, Dormer [Электрон. ресурс] – Режим доступа : [http : // http://www.mirstan.ru//](http://www.mirstan.ru/)



Приложение А (рекомендуемое)

```

Private Sub Пуск_Click()
' *****
' ПРОГРАММА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ПРОДОЛЬНОГО ТОЧЕНИЯ
' НА СТАНКЕ С БЕССТУПЕНЧАТЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПРИВОДА
' *****
'
'           ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ
'
'           СВЕДЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПЕРЕХОДЕ
Dim D As Single ' Диаметр обрабатываемой поверхности
Dim L As Single ' Длина обрабатываемой поверхности
Dim TR As Single ' Глубина резания
Dim LVr As Single ' Величина врезания и перебега инструмента
Dim Ra As Single ' Шероховатость обработанной поверхности
'
'           СВЕДЕНИЯ О МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕМ СТАНКЕ ГС1750Ф3С1

nmin = Worksheets("БД").Range("I47").Value ' Минимальная частота вращения шпинделя
nmax = Worksheets("БД").Range("I48").Value ' Максимальная частота вращения шпинделя
Smin = Worksheets("БД").Range("I49").Value ' Минимальная продольная подача
Smax = Worksheets("БД").Range("I50").Value ' Максимальная продольная подача
ND = Worksheets("БД").Range("I51").Value ' Мощность двигателя привода
KPD = Worksheets("БД").Range("I52").Value ' КПД коробки скоростей станка
'
'           СВЕДЕНИЯ О РЕЖУЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ

Rv = Worksheets("БД").Range("E40").Value ' Радиус при вершине резца, мм
Gam = Worksheets("БД").Range("E39").Value ' Передний угол режущей пластины
Tsm = Worksheets("БД").Range("S41").Value ' Время на смену инструмента
KPG = Worksheets("БД").Range("N42").Value ' Число режущих граней инструмента

' ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕБЕСТОИМОСТИ
' ОСНОВНОГО ВРЕМЕНИ ПЕРЕХОДА

Ca = Worksheets("Цены").Range("E21").Value ' Цена одного станко-часа
Co = Worksheets("Цены").Range("E48").Value ' Часовая заработная плата рабочего
Sins = Worksheets("Цены").Range("E52").Value ' Цена инструмента
Se = Worksheets("Цены").Range("E56").Value ' Цена 1кВт.ч электроэнергии

' КОЭФФИЦИЕНТЫ И ПОКАЗАТЕЛИ СТЕПЕНЕЙ В УРАВНЕНИИ
' РАСЧЕТА ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ

Cv = Worksheets("БД").Range("O9").Value
Xv = Worksheets("БД").Range("K7").Value
Yv = Worksheets("БД").Range("L7").Value
Mv = Worksheets("БД").Range("M").Value

' КОЭФФИЦИЕНТЫ И ПОКАЗАТЕЛИ СТЕПЕНЕЙ В УРАВНЕНИЯХ РАСЧЕТА
' СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ

Cpx = Worksheets("БД").Range("O16").Value
Xpx = Worksheets("БД").Range("J14").Value

```



```

Ypx = Worksheets("БД").Range("K14").Value
Npx = Worksheets("БД").Range("L14").Value
Cpy = Worksheets("БД").Range("O23").Value
Xpy = Worksheets("БД").Range("J21").Value
Ypy = Worksheets("БД").Range("K21").Value
Npy = Worksheets("БД").Range("L21").Value
Cpz = Worksheets("БД").Range("O30").Value
Xpz = Worksheets("БД").Range("J28").Value
Ypz = Worksheets("БД").Range("K28").Value
Npz = Worksheets("БД").Range("L28").Value

```

КОЭФФИЦИЕНТ И ПОКАЗАТЕЛИ СТЕПЕНЕЙ В УРАВНЕНИИ РАСЧЕТА ШЕРОХОВАТОСТИ

```

k0 = Worksheets("БД").Range("A35").Value
k1 = Worksheets("БД").Range("B35").Value
k2 = Worksheets("БД").Range("C35").Value
k3 = Worksheets("БД").Range("D35").Value
k4 = Worksheets("БД").Range("E35").Value

```

```
Dim i, j, p, pr As Integer
```

```
Dim V, Tij, PZ, Raij, Toij As Single
```

```
Dim NRij As Double
```

```
Dim Nopt, Sopt, Vopt, Topt, Pzopt, NRopt, Raopt, Toopt As Single
```

```
Caos = 0 ' Затраты по оборудованию (сумма по переходам)
```

```
Coos = 0 ' Затраты на зарплату (сумма по переходам)
```

```
Cinos = 0 ' Затраты на инструмент (сумма по переходам)
```

```
Ceos = 0 ' Затраты на электроэнергию (сумма по переходам)
```

```
' Очистка диапазона ячеек для вывода результатов оптимизации
```

```
Range("V3:AG12").Select
```

```
Selection.ClearContents
```

```
Range("V3").Select
```

```
pr = Worksheets("ОПТБСР").Range("D13").Value ' Количество переходов
```

```
For p = 4 To pr + 3 ' Цикл по количеству оптимизируемых технологических переходов
```

```
D = Worksheets("ОПТБСР").Cells(15, p).Value ' Диаметр обрабатываемой поверхности
```

```
L = Worksheets("ОПТБСР").Cells(16, p).Value ' Длина обрабатываемой поверхности
```

```
TR = Worksheets("ОПТБСР").Cells(17, p).Value ' Глубина резания
```

```
SN = Worksheets("ОПТБСР").Cells(18, p).Value ' Подача (нормативная), мм/об
```

```
LVP = Worksheets("ОПТБСР").Cells(19, p).Value ' Величина врезания и перебега инструмента
```

```
Ra = Worksheets("ОПТБСР").Cells(20, p).Value ' Шероховатость обработанной поверхности
```

```
Coopt = 100000 ' Начальное значение критерия оптимизации, как достаточно большое число
```

```
For n = nmin To nmax Step 10 ' Цикл по частоте вращения шпинделя с шагом 10 об/мин
```

```
' Проверка ограничения по предельной допустимой частоте вращения токарного патрона
```

```
If n > Worksheets("ОПТБСР").Range("L28").Value Then GoTo M2
```

```
' Расчет скорости резания в м/мин
```

```
V = 3.14 * D * n / 1000
```

```
' Проверка ограничений по рекомендуемому диапазону скорости резания
```

```
If V > Worksheets("ОПТБСР").Range("I42").Value Then GoTo M2
```

```
If V < Worksheets("ОПТБСР").Range("I41").Value Then GoTo M2
```

```
For S = Smin To Smax Step 0.01 ' Цикл по продольной подаче суппорта с шагом 0,01 мм/об
```

```
' Проверка ограничения подачи по величине радиуса скругления при вершине резца
```

```
If S > 0.9 * Rv Then GoTo M1
```

```
' Проверка ограничений по прочности режущей пластины
```




```

If S > Worksheets("ОПТБСР").Range("I32").Value Then GoTo M1
' Проверка ограничений по условиям обеспечения устойчивого стружкодробления
If S < Worksheets("ОПТБСР").Range("I36").Value Then GoTo M1
If S > Worksheets("ОПТБСР").Range("I37").Value Then GoTo M1
' Расчет составляющих силы резания Px, Py, Pz в кгс.
PX = Cpx * TR ^ Xpx * S ^ Ypx * V ^ Npx
PY = Cpy * TR ^ Xpy * S ^ Ypy * V ^ Npy
PZ = Cpz * TR ^ Xpz * S ^ Ypz * V ^ Npz
' Проверка ограничения по допустимому усилию в направлении подачи инструмента
If PX * 10 > Worksheets("ОПТБСР").Range("K25").Value Then GoTo M1
' Проверка ограничения по величине допустимой деформации в направлении,
' перпендикулярном подаче
If PY * L ^ 3 / (3# * 21000# * 3.14 * D ^ 4 / 64#) > Worksheets("ОПТБСР").Range("M39").Value
Then GoTo M1
' Расчет мощности, затрачиваемой на резание
NRij = PZ * V / 6120#
' Проверка ограничения по мощности привода станка
If NRij > ND * KPD Then GoTo M1
' Расчет крутящего момента от главной составляющей силы резания
Mkrij = PZ * D / 200#
' Проверка ограничения по допустимому передаваемому крутящему моменту
If Mkrij > Worksheets("ОПТБСР").Range("L29").Value Then GoTo M1
' Расчет величины шероховатости обработанной поверхности
Raij = k0 * S ^ k1 * (90# + Gam) ^ k4 / (Rv ^ k2 * (V / 60#) ^ k3)
' Проверка ограничения по шероховатости, обработанной поверхности
If Raij > Ra Then GoTo M1
' Расчет величины основного времени перехода
Toij = (L + LVr) / (n * S)
' Расчет периода стойкости инструмента
Tij = (Cv / (V * TR ^ Xv * S ^ Yv)) ^ (1 / Mv)
' Основное время с учетом доли затрат времени на смену изношенного инструмента
Todij = Toij * (1 + (Tsm / Tij))
' Затраты на одну минуту основного времени работы режущего инструмента
Cin = Sins / (Tij * KPG)
' Затраты на электрическую энергию, расходуемую на одну минуту основного времени
Ce = Se * NRij / (60# * KPD)
' Расчет критерия оптимизации - себестоимости
' основного времени технологического перехода
CPT = Todij * (Co + Ca) / 60# + Toij * (Cin + Ce)
' Проверка критерия оптимизации на минимум значения целевой функции
If CPT > Coopt Then GoTo M1
' Сохранение наилучших значений режима резания на текущем шаге оптимизации
Nopt = n      ' Оптимальная частота вращения шпинделя
Sopt = S      ' Оптимальная продольная подача
Vopt = V      ' Оптимальная скорость резания
Topt = Tij    ' Период стойкости инструмента
Pzopt = PZ    ' Главная составляющая силы резания
NRopt = NRij  ' Мощность, затрачиваемая на резание
Raopt = Raij  ' Шероховатость обработанной поверхности
Toopt = Toij  ' Основное время на выполнение перехода

```



```

Coopt = CPT ' Сохранение текущего значения критерия оптимизации
' Составляющие технологической себестоимости основного времени перехода
Cao = Todij * Ca / 60# ' Затраты на оборудование
Coo = Todij * Co / 60# ' Затраты на зарплату
Cino = Cin * Toij ' Затраты на инструмент
Ceo = Ce * Toij ' Затраты на электроэнергию

```

```

M1:

```

```

Next S ' Конец цикла по диапазону подач станка

```

```

M2:

```

```

Next n ' Конец цикла по диапазону скоростей шпинделя станка

```

ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТИМИЗАЦИИ

```

Worksheets("ОПТБСР").Cells(3, p + 18).Value = Vopt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(4, p + 18).Value = Nopt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(5, p + 18).Value = Sopt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(6, p + 18).Value = Sopt * Nopt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(7, p + 18).Value = Topt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(8, p + 18).Value = Raopt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(9, p + 18).Value = NROpt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(10, p + 18).Value = Pzopt * 9.87
Worksheets("ОПТБСР").Cells(11, p + 18).Value = Toopt
Worksheets("ОПТБСР").Cells(12, p + 18).Value = Coopt
Caos = Caos + Cao ' Затраты на оборудование (сумма по переходам)
Coos = Coos + Coo ' Затраты на зарплату (сумма по переходам)
Cinos = Cinos + Cino ' Затраты на инструмент (сумма по переходам)
Ceos = Ceos + Ceo ' Затраты на электроэнергию (сумма по переходам)
Next p ' Конец цикла по заданным технологическим переходам
' Вывод данных для построения диаграммы
Worksheets("ОПТБСР").Range("AI27").Value = Caos
Worksheets("ОПТБСР").Range("AI28").Value = Coos
Worksheets("ОПТБСР").Range("AI29").Value = Cinos
Worksheets("ОПТБСР").Range("AI30").Value = Ceos
End Sub

```

