

М/ 334956

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

ЗАГОРУЙКО ЕЛЕНА АНТОНОВНА

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ
ОПТИМИЗАЦИИ ОПЕРАЦИЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ
НА АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ОБОРУДОВАНИИ

Специальность 05.02.07 - "Автоматизация
машиностроения"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Москва - 1979 г.

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ЗАГОРУЙКО ЕЛЕНА АНТОНОВНА

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ
ОПТИМИЗАЦИИ ОПЕРАЦИЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ
НА АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ОБОРУДОВАНИИ

Специальность 05.02.07 - "Автоматизация
машиностроения"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1337956

Загоруико Е. А. Исследовану

Москва - 1979 г.

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель — доктор технических наук, и.о. про-
фессора КАПУСТИН Н.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор ДАЩЕНКО А.И.

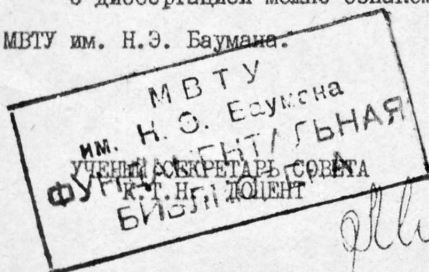
кандидат технических наук,
доцент СКОРОДУМОВ С.В.

Ведущее предприятие указано в решении специализирован-
ного Совета.

Защита состоится " ____ " _____ 1979 г. на заседа-
нии специализированного Совета КО53.15.01 Московского ордена
Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего техниче-
ского училища им. Н.Э. Баумана по адресу: Москва 107005,
2-я Бауманская ул., 5.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверен-
ные печатью, просим направить по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
МВТУ им. Н.Э. Баумана.



Мельников Г.Н.

Актуальность. Повышение требований к качеству и надежности продукции машиностроения, усложнение выпускаемых изделий не только увеличивают трудоемкость, сроки и стоимость проектных работ, но и приводят к необходимости разработки оптимальных технологических процессов.

Широкое внедрение ЭВМ в практику инженерных расчетов, переход к автоматизированному проектированию технологических процессов повышает роль математического обеспечения, которое состоит из совокупности математических методов, моделей и алгоритмов для решения соответствующих задач и обработки информации с помощью ЭВМ. Основная задача автоматизированного проектирования заключается в повышении эффективности проектируемых технологических процессов за счет оптимизации и интенсификации при одновременном сокращении сроков и стоимости проектных работ.

Широкое распространение автоматизированного оборудования — металлорежущих станков: автоматов, полуавтоматов, агрегатных станков и станков с ЧПУ — во многом определяет целесообразность применения методов оптимизации. Это обусловлено меньшим влиянием факторов субъективного характера. Основные трудности, возникающие при проектировании оптимальных станочных операций, вызваны слабой формализуемостью этих задач и сложностью адаптации известных методов решения к их специфике.

Цель работы. Разработка многоуровневой оптимизации операций обработки деталей на автоматизированном оборудовании. Исследование проводилось на примере операций обработки резанием типовых машиностроительных деталей на автоматизированных металлорежущих станках в серийном и массовом производстве.

Методы исследования. Применялись теоретические и экспериментальные методы. Теоретические методы: методы исследования операций; математической статистики; теории игр; расчетно-аналитический метод исследования точности; теории производительности машин и механизмов; теории резания. Экспериментальный метод предусматривал отладку соответствующих программ на ЭВМ и проверку разработанных математических моделей на их адекватность реальным технологическим процессам. Результаты теоретических исследований проверялись в производственных условиях.

Научная новизна. Разработана методика многоуровневой оптимизации операций обработки, адаптирующаяся к различным условиям, позволяющая находить структуру операции и необходимые технико-экономические показатели, обеспечивать заданную точность обработки. В основу методики положена разработанная система взаимосвязанных моделей, которая позволяет решать задачу оптимизации по частям. При решении задач каждого уровня оптимизации получается не единственный вариант, а группа оптимальных вариантов. Необходимость использования решения задач предшествующего уровня оптимизации в качестве исходной информации на последующем уровне требует построения непротиворечивой системы взаимосвязанных частных критериев.

Практическая ценность. Предлагаемая методика многоуровневой оптимизации позволяет обеспечивать качество технологического решения за счет разработанного алгоритма для нахождения плана обработки отдельной поверхности детали, проверки ограничений и использования сформулированных для каждого уровня оптимизации критериев. Кроме того, при применении разработанной методики уменьшается время нахождения оптимального варианта операции. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработан комплекс алгоритмов решения задач построения оптимальных станочных операций.

Реализация результатов работы. Результаты работы используются при автоматизированном проектировании технологических процессов механической обработки на Владимирском тракторном и Тульском комбайновом заводах, а также на других машиностроительных предприятиях. Реализация разработанной методики на ЭВМ позволила снизить трудоемкость проектных работ.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на IV Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции "Научные основы производственных процессов в машиностроении и приборостроении" в 1975 г.; на научных семинарах кафедр МВТУ им. Н.Э. Баумана "Технология механо-сборочного производства", "Станки и автоматы", "Прикладная математика", кафедры "Технология приборостроения" Ленинградского института точной механики и оптики в 1974-1979 гг.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в пяти научных статьях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, изложенных на 135 страницах машинописного текста, библиографического списка, содержащего 97 наименований, включает 24 рисунка и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Состояние проблемы и постановка задачи исследования.

Одним из наиболее перспективных направлений автоматизированного проектирования станочных операций как основных элементов технологического процесса является построение оптимальных станочных операций посредством применения методов математического моделирования. В качестве исходной информации используются данные о конструкции детали, технические требования на ее изготовление, вид заготовки, программа выпуска, модели станков, конструкция приспособлений и некоторые другие данные.

При построении оптимальной станочной операции для автоматизированного оборудования выделяются три уровня оптимизации:

1/ формирование множества переходов при обработке отдельной поверхности детали и нахождение параметров каждого перехода;

2/ нахождение последовательности выполнения переходов при обработке детали;

3/ окончательное формирование операции из множества переходов с учетом возможности совмещения выполнения групп переходов во времени.

Многовариантность задач каждого уровня, необходимость учета их взаимозависимости приводят к тому, что при решении каждой задачи обязательным является проведение следующих этапов:

1/ постановка задачи; 2/ построение математической модели;

3/ нахождение алгоритма решения; 4/ проверка адекватности модели изучаемому процессу и оценка решения; 5/ реализация решения и контроль его правильности – что составляет основу методологии исследования операций.

Основой операционного подхода является то, что поиск оптимального решения всегда предполагает построение математической модели процесса. Соображения качественного характера учитываются обязательно, а иногда становятся решающими в оценке ва-

рианта. При построении математической модели процесса необходимо: 1/ оценить качество исходной технологической информации; 2/ построить и обосновать критерий и принцип оптимальности; 3/ сформировать систему ограничений, активных в условиях конкретной задачи.

Рассмотрение модели станочной операции как цепной, состоящей из моделей, построенных на каждом уровне, приводит к проблеме "стыковки" этих моделей. Требования "стыковки" должны учитываться как при выборе критериев и принципов оптимальности, так и при выборе формы решения задач каждого уровня.

Оптимизации режимов резания, построению оптимальных станочных операций посвящена обширная литература. Следует отметить работы Горанского Г.К., Гаврилова А.Н., Капустина Н.М., Соломенцева Ю.М., Гильмана А.М., Старкова В.К. и других. Анализ основных направлений исследований по разработке математического обеспечения построения оптимальных станочных операций позволил сделать следующие выводы:

1. Применяемые алгоритмы поиска оптимального решения требуют использования строго определенной формы записи критерия и системы ограничений, что ограничивает возможность их реализации при изменении условий обработки, при уточнении используемых технологических зависимостей;

2. Во многих работах задачи различных уровней оптимизации рассматриваются без их взаимосвязи, что затрудняет дальнейшее применение полученных результатов. Так, при оптимизации режимов резания при обработке детали на конкретном оборудовании, полученные результаты не "увязываются" с задачей окончательного формирования станочной операции;

3. Проектирование с использованием только нормативного материала не позволяет учитывать такие важные моменты, как требования точности, конкретные условия обработки;

4. Применение эвристических методов оптимизации не гарантирует оптимальности выбранного варианта;

5. Разработано большое число моделей для конкретных условий обработки, трудно адаптирующихся к измененным условиям.

Проведенный анализ и указанная цель данной работы позволили сформулировать основные задачи исследования следующим образом:

1. Систематизировать методы математического моделирования при построении оптимальных станочных операций;

2. Разработать экономичный алгоритм для нахождения плана обработки отдельной поверхности детали;

3. Разработать математические модели формирования оптимальных станочных операций;

4. Разработать методику многоуровневой оптимизации операций обработки, основанную на использовании системы взаимосвязанных моделей, построенных для каждого уровня оптимизации;

5. Реализовать разработанную методику и определить технико-экономическую эффективность полученных результатов.

Разработанные научные положения и методика многоуровневой оптимизации иллюстрируются на примере построения операций обработки на токарных вертикальных многошпиндельных полуавтоматах и сверлильных станках с ЧПУ.

Глава II. Технологические и математические предпосылки многоуровневой оптимизации операций обработки деталей.

Выбор типа математического моделирования, наиболее эффективного в условиях конкретной задачи определяется ее технологической сущностью, видом представления исходной технологической информации, общей целью исследования.

Многоуровневая задача проектирования станочной операции привела бы к очень сложной модели с большим числом управляемых переменных. Поэтому для получения численного решения модель операции рассматривается как система взаимосвязанных моделей для решения задач каждого уровня. Это приводит к необходимости "стыковки" этих моделей, что накладывает свои ограничения на выбор управляемых переменных, требует построения непротиворечивой системы частных критериев.

Выбор модели последовательного принятия решений при нахождении плана обработки отдельной поверхности детали обусловлен самим процессом технологического решения этой задачи - последовательным выполнением переходов при обработке поверхности, влиянием параметров предшествующего перехода на параметры последующего.

Задачи II-го и III-го уровней по своей сущности - распределительные задачи. Выбором управляемых переменных, соответствующей формализацией задач их можно свести к моделям целочисленного программирования, эффективные методы для реализации кото-

рых уже разработаны.

Вопрос о качестве математической модели правомерно ставить и решать лишь относительно определенной цели. В реальных задачах выбора решения зачастую имеется несколько целей, каждой из которых соответствует свой локальный критерий. Критерии, применяемые в практике проектирования станочных операций, являются обобщенными скалярными критериями. На основе метода экспертных оценок пар ситуаций (оценки качественного характера) в работе формулировалась задача линейного программирования, решение которой – числовые коэффициенты значимости локальных критериев.

Влияние ошибки эксперимента при нахождении технологических зависимостей на положение оптимума целевой функции позволяет не только обоснованно формировать критерий задачи, но и назначать минимальную "уступку" по данному критерию. Решения, отличающиеся меньше, чем на уступку, не различаются и образуют группу оптимальных вариантов.

Сравнение локальных критериев по значимости, нахождение коэффициентов значимости позволяют сформулировать принцип оптимальности.

Глава III. Оптимизация плана обработки поверхности детали в станочной операции.

Решение задачи I уровня – нахождение плана обработки отдельной поверхности детали – важная составная часть всех задач проектирования станочной операции. Именно при решении этой задачи впервые были использованы методы математического программирования.

Основные положения, сформулированные в главе II настоящей работы, позволили разработать методику выбора оптимального плана обработки отдельной поверхности детали, основанную на принципе динамического программирования. Отличие предложенной методики от существующих заключается в том, что при формировании маршрута обработки просчет вариантов начинается с последнего перехода, то есть от детали. Преимущество разработанной методики – в сокращении времени счета каждого варианта, в уменьшении числа вариантов, в возможности формирования обоснованных требований к качеству заготовки.

Информация, необходимая для построения математической модели, предполагает наличие данных о детали, заготовке, оборудовании. По имеющимся стойкостным зависимостям $T-u$ для конк-

ретных условий обработки назначается рациональная скорость резания v . Массив подач $A^{(s)} = \{S_{\max}, \dots, S_k, \dots, S_{\min}\}$ определяется механизмом подачи станка. Возможные глубины резания задаются рядом значений от $t_{\min}$ до $t_{\max}$ с шагом γ , где величина γ определяется конструкцией настроечного устройства, а $t_{\min}$ — наименьшая глубина резания, допускаемая физикой процесса. Предполагается, что в процессе обработки заготовка может иметь ряд значений допусков: $\delta_{\text{заг}}, \dots, \delta_i, \dots, \delta_{\text{дет}}$.

Так как технологические параметры, назначаемые на каждом переходе, зависят от параметров предшествующего перехода, то основная идея может быть сформулирована следующим образом: зная все возможные состояния заготовки после обработки части припуска, для каждого из этих состояний находится оптимальный маршрут обработки оставшейся части припуска. Характеристикой, показывающей состояние заготовки после какого-либо перехода, является ожидаемая погрешность обработки. Зная параметры планируемого перехода, ожидаемую погрешность можно было бы рассчитать по зависимости суммарной погрешности Δ_{Σ} для конкретного метода механической обработки.

Общий припуск Z_0 разбивается на N этапов. Величина первого этапа (нумерация этапов ведется от детали) равна $\ell_1 = t_{\min}$, каждый следующий по порядку этап, увеличиваясь на шаг γ , включает все этапы с меньшими номерами. При обработке любого этапа с номером m (величина его равна $\ell_m = t_{\min} + (m-1)\gamma$, $m = 1, 2, \dots, N$) необходимо обеспечить заданную точность $\delta_{\text{дет}}$ поверхности. Просчет начинается от первого этапа в порядке возрастания номеров.

Перебор вариантов обработки первого этапа и любого этапа при однопереходной обработке отличается от общей схемы некоторыми особенностями, хотя и последовательность шагов, и вид рекуррентных формул остаются всегда одинаковыми. При однопереходной обработке этапы соответствуют последнему переходу, поэтому подача, выбираемая из массива $A^{(s)}$, должна удовлетворять ограничению по шероховатости поверхности детали: $S \leq [S_{R_2}]$. Требования достижения нужной точности $\delta_{\text{дет}}$ позволяют сформировать множество возможных начальных состояний (или множество возможных начальных допусков) $A_m^{(\Delta)}$ для этапа m . Если суммарная погрешность обработки Δ_{Σ} этапа m при выбранных параметрах меньше или равна $\delta_{\text{дет}}$, то этот вариант участвует в срав-

нении и для него вычисляется значений целевой функции $\{f(t_m; \delta_{m,i}; S_{mk})\}$. Исходный начальный допуск $\delta_{m,i}$ вносится в множество $A_m^{(\Delta)}$. Найдя $f_m(\delta_{m,i}) = \text{opt} \{f(t_m; \delta_{m,i}; S_{mk})\}$, где оптимум берется по всем возможным подачам S_{mk} , можно определить оптимальный вариант однопереходной обработки этапа с номером m при начальном допуске $\delta_{m,i} \in A_m^{(\Delta)}$.

В случае многопереходной обработки число сравниваемых вариантов для каждого этапа определяется лишь параметрами первого (от заготовки) перехода, так как величина оставшейся части припуска равна величине этапа с меньшим порядковым номером и оптимальный маршрут его обработки для каждого возможного состояния заготовки уже найден ранее.

Применяя метод уступок, можно определить целую группу "оптимальных вариантов" планов обработки отдельной поверхности детали, что важно при решении задач II и III уровней оптимизации.

Для оценки приемлемости предлагаемого алгоритма проводился анализ чувствительности решения к возможным вариациям входных данных. Проведенный анализ показал, что разработанный алгоритм является экономичным и позволяет находить оптимальный план обработки отдельной поверхности детали при заданном общем припуске с одновременным расчетом промежуточных припусков.

Глава IV. Формирование оптимальных станочных операций.

Поиск оптимального плана обработки отдельной поверхности, проведенный с использованием методики, изложенной в главе III, позволяет сформировать множество переходов для обработки детали. В зависимости от схемы построения станочной операции последовательность обработки совокупности поверхностей детали определяется или только необходимостью последовательной обработки отдельных поверхностей, или возможностью одновременной обработки нескольких поверхностей. В данной главе рассматриваются три типа задач формирования оптимальных станочных операций.

К задачам первого типа относятся задачи нахождения только наилучшей последовательности выполнения переходов. Частные постановки задачи, позволяющие снизить размерность и получить численное решение на ЭВМ, рассмотрены в работе на примере обработки гладких отверстий на станках с ЧПУ.

К задачам второго типа относятся задачи построения станочных операций, в которых кроме выбора последовательности выполнения переходов, требуется провести объединение переходов на

одной позиции станка или на одном станке.

При построении любой операции, в которой происходит выбор последовательности выполнения и объединения переходов, можно выделить переход или группу одновременно выполняемых переходов с наибольшей длительностью реализации. Используя резервы нелимитирующих работ, можно увеличить время их выполнения, не меняя длительности всей операции, и получить выигрыш по себестоимости всего комплекса работ, по точности обработки или по равномерной загрузке на всех позициях станка. Это задача третьего типа.

Анализ технологической сущности задач позволил сделать вывод о целесообразности использования моделей целочисленного программирования.

Задачи первого типа укладываются в схему задачи коммивояжера. Исследование критериев оптимальности для конкретного оборудования (например, сверлильные станки с ЧПУ) показывают необходимость уменьшения вспомогательного времени при нахождении последовательности обработки поверхностей детали. Использование специфических структурных свойств конкретных моделей позволяет при решении задач первого типа применить модифицированный метод "ветвей и границ". Построение исходной матрицы временных затрат производится с учетом содержания выполняемых переходов, технологических возможностей станка, его конструктивных особенностей и в зависимости от конкретной постановки задачи. В работе рассматриваются три возможные постановки задач первого типа и приводится их решение.

Необходимость учета возможности одновременной обработки нескольких поверхностей детали возникает при формировании операций на многопозиционных станках. Существующие методы решения этой задачи различаются способами организации полного перебора вариантов и способами кодирования исходной информации. Распределение совокупности переходов по рабочим позициям станка на основе технологических правил позволяет сформировать множество допустимых решений задачи. При рассмотрении многоместных, многоинструментальных и последовательно-параллельных схем обработки к числу технологических ограничений могут быть отнесены:

- необходимость разделения черновой и чистовой обработки;
- возможность совмещения выполнения переходов на одной позиции станка. Если необходимо обеспечить заданный такт работы,

то формируется ограничение на суммарное время обработки на каждой позиции.

Для решения задач II типа в данной главе проведена их формализация путем введения булевых переменных:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если поверхность } i \text{ обрабатывается на позиции } j, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

При этом задача распределения совокупности переходов совмещается с задачей поиска оптимального варианта обработки заготовки на каждой позиции станка. Все ограничения задачи посредством применения булевых переменных могут быть записаны в виде:

$$\sum_j a_{ij} x_{ij} = 1; \quad \sum_i \sum_j b_{ijq} x_{ij} \leq d_q,$$

где i - индекс перехода; j - индекс позиции станка. Формирование критерия оптимальности производится с учетом необходимости:

- оценки различных вариантов совмещения выполнения переходов по позициям станка;

- учета характера оценки вариантов обработки отдельной поверхности, использованной на I уровне оптимизации.

Аддитивный алгоритм (метод частичного перебора) хорошо приспособлен для решения задач в булевых переменных. Численный эксперимент показал, что при отсутствии совмещений групп переходов выигрыш во времени счета для нахождения оптимального варианта минимален, но он тем больше, чем больше вариантов участвует в переборе и чем больше групп переходов может быть объединено на одной позиции станка.

Формализация задач III типа проводилась так же путем введения булевых переменных:

$$x_{uv} = \begin{cases} 1, & \text{если на позиции } u \text{ используются комбинации } v \\ & \text{режимов резания,} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

после чего она решается как задача о назначениях. Задача решается венгерским методом.

Анализ подхода к решению задач формирования оптимальных станочных операций позволяет оценить характер взаимосвязи различных уровней оптимизации. В зависимости от конкретных условий задачи, возможность оптимизации на уровне формирования станочной опера-

ции (II и III уровни) появляются лишь при наличии целой группы оптимальных в определенном смысле вариантов. Эта группа вариантов является исходным (достаточно узким) множеством возможных решений на следующих уровнях. Очевидна необходимость построения системы частных критериев, обеспечивающих непротиворечивость выбора на каждом уровне.

Глава V. Реализация и технико-экономическая эффективность проведенных исследований.

Разработанная методика многоуровневой оптимизации была использована при построении оптимальных станочных операций на вертикальных токарных многошпиндельных полуавтоматах последовательного действия при обработке стальных штампованных деталей типа "диски". Реализация методики осуществлялась на ЭВМ серии ЕС и Минск-32. При построении операции решались задачи нахождения плана обработки отдельных поверхностей, распределения множества переходов по позициям, нахождения оптимального варианта обработки на каждой позиции станка и операции в целом. Для оптимизации переходов на отдельную поверхность использовалась методика, изложенная в настоящей работе. Критерий оптимальности в задаче I уровня - суммарная технологическая себестоимость выполнения переходов. При этом учитывались ограничения по мощности привода станка, по прочности режущей части инструмента, по стойкости инструмента, по усилию, допускаемому механизмом подачи станка (на черновых переходах), по точности обработки, по кинематике станка. Выделение наиболее продолжительного по времени выполнения перехода, учет возможности совмещения переходов во времени дают возможность сформировать массив совокупностей переходов на поверхности детали. Данные, полученные на этом уровне, используются при распределении переходов по позициям станка. Введение булевых переменных ($x_{ij} = 1$ или 0) позволяет записать в виде линейных ограничений условия, связанные с закреплением переходов за определенными позициями, возможностью совмещения переходов на одной позиции, необходимой очередностью их выполнения. Алгоритм решения задачи основан на методе частичного перебора. При выборе варианта решения учитывается как себестоимость, так и продолжительность всей операции.

Найденное распределение переходов по рабочим позициям позволяет выделить и лимитирующую позицию, в которой продолжитель-

ность операции наибольшая. Снижение режимов на нелимитирующих позициях должно удовлетворять двум условиям: общая продолжительность станочной операции не увеличивается; суммарный крутящий момент от сил резания, приложенных к столу станка, должен быть минимальным, так как его величина оказывает существенное влияние на точность обработки. Задача формулируется и решается как задача о назначении. При этом используются решения, полученные на I и II уровнях оптимизации. В результате решение задачи о назначении продолжительности обработки на всех позициях выравнивается. Результаты математического моделирования позволили выявить влияние отдельных технологических факторов на построение операций в различных производственных условиях. Проверка адекватности математической модели реальному процессу проводилась методами статистического анализа.

Разработанные и реализованные на ЭВМ модели и алгоритмы, проверенные в производственных условиях, подтвердили правильность основных положений работы. Анализ экономической эффективности показал значительное сокращение трудоемкости проектных работ. Экономическая эффективность характеризовалась повышением производительности оборудования на 13-17%, снижением технологической себестоимости на 10-13%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволили применительно к станкам-полуавтоматам и автоматам формировать математические модели, алгоритмы решения для которых не накладывают жестких ограничений на используемые технологические зависимости. Предлагаемый подход к многоуровневой оптимизации накладывает определенные требования на характер получаемого решения каждого уровня, позволяет использовать его в качестве исходной информации на последующем уровне оптимизации, что обеспечивается логической взаимосвязью и непротиворечивостью локальных критериев каждого уровня. Разработанная методика обосновывает и в достаточной степени гарантирует оптимальность выбранного варианта станочной операции.

Были получены следующие новые научные результаты:

1. Методика многоуровневой оптимизации операций обработки деталей на автоматизированном оборудовании.

2. Алгоритм нахождения оптимального плана обработки отдельной поверхности детали, основанный на принципах динамического программирования.

3. Модели целочисленного программирования для решения задач нахождения последовательности выполнения и объединения переходов обработки совокупности поверхностей детали.

На основании выполненных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Реализация методики многоуровневой оптимизации требует проведения критериальных исследований рассматриваемого технологического процесса, изучения значимости критериев каждого уровня оптимизации.

2. При нахождении плана обработки отдельной поверхности детали целесообразно использовать алгоритм, разработанный на основе принципов динамического программирования. Алгоритм обеспечивает достижение требуемой точности обработки, сокращает время просчета вариантов и позволяет формировать обоснованные требования к выбору заготовки.

3. Для решения задач многоуровневой оптимизации необходимо получать не единственный оптимальный вариант, а группу оптимальных вариантов, среди которых будет производиться выбор решения на следующем уровне оптимизации.

4. Для формализации задачи формирования станочной операции из множества технологических переходов рекомендуется использовать булевы переменные и строить модели целочисленного программирования. Существующие экономичные алгоритмы позволяют существенно снизить трудоемкость нахождения решения.

5. Теоретическая и экспериментальная проверки подтвердили правильность основных научных положений работы. Предлагаемая методика может быть использована для прогнозирования ожидаемой точности и оценки промежуточных размеров в конкретных производственных условиях.

6. Разработанная методика многоуровневой оптимизации, проиллюстрированная на примере операций обработки на токарных вертикальных многшпиндельных полуавтоматах, адаптируется к другим условиям обработки.

7. Внедрение полученных результатов на Тульском комбайновом и Владимирском тракторном заводах дало экономический эффект в 80000 рублей.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Капустин Н.М., Полтавец О.Ф., Загоруйко Е.А. Исследование вопросов оптимального проектирования маршрута обработки элементарных поверхностей детали. Изв.вузов, "Машиностроение", 1969, № 6, с.145-149.

2. Капустин Н.М., Диланян Р.З., Загоруйко Е.А., Воронин Н.Л. Построение оптимальных операций на вертикальных многошпиндельных полуавтоматах. "Вестник машиностроения", 1973, № II, с.51-55.

3. Загоруйко Е.А. Оптимизация станочных операций. Тезисы докладов IУ Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции "Научные основы автоматизации производственных процессов в машиностроении и приборостроении", М., 1975, с.57-58.

4. Капустин Н.М., Нуриев Э.А., Загоруйко Е.А. Построение оптимальных станочных операций на многократных шлифовальных станках. Изв.вузов, "Машиностроение", 1975, № 5, с.169-173.

5. Капустин Н.М., Загоруйко Е.А., Кравченко И.И. Оптимизация распределения припуска на обработку поверхности детали. Изв.вузов, "Машиностроение", 1978, № 6, с.153-156.