

М295352

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ им. Н. Э. БАУМАНА

КАПУСТИН Николай Михайлович

На правах рукописи

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ.

(Специальность 05.02.08 – Технологии машиностроения)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР
МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ им. Н. Э. БАУМАНА

КАПУСТИН Николай Михайлович

На правах рукописи

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ.

(Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

М 295352

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1295352

Капустин Н. М. Принципы и

Москва

1976

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана.

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук, профессор ГАВРИЛОВ А.Н.

Заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
действительный член АН Латвийской ССР,
доктор технических наук, профессор ГРАНОВСКИЙ Г.И.

Член корр. АН БССР,
доктор технических наук, профессор ГОРАНСКИЙ Г.К.

Ведущее предприятие - Ленинградское станкостроительное объединение им.Свердлова.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1976 г.
на заседании специализированного Совета Д-33/4 по технологии машиностроения Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища им.Н.Э.Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская, 5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им.Баумана.
Автореферат разослан "___" _____ 1976 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА
доктор технических наук, профессор

ВОЛЧКЕВИЧ Л.И.

Л-101349 от 9/7-76 г. Тип.МВТУ Объем 2 п.л. Зар.1523. Тир.100.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Решения XXV съезда КПСС определяли большие масштабы развития народного хозяйства нашей страны и, в частности, машиностроения, поставили новые научно-технические проблемы. Первостепенное значение приобретает качество и эффективность производства во всех отраслях машиностроения. Вместе с тем качество изделий в значительной степени определяется совершенством технологического процесса. Большое количество исходных данных и факторов, влияющих на построение технологического процесса, не позволяет проанализировать множество допустимых вариантов. При выборе варианта не всегда обеспечивается оптимальное решение. Системный подход при традиционном методе проектирования весьма затруднителен, технолог не в состоянии одновременно заниматься оптимизацией технологических процессов и ускорением проектных работ.

Технология машиностроения как наука не может развиваться, ориентируясь только на традиционные методы проектирования. Рост продукции машиностроения, непрерывное повышение качества и сложности выпускаемых изделий требуют оптимальных вариантов разрабатываемых технологических процессов. Поэтому возникли объективная необходимость в принципиально новом подходе к проблеме проектирования. Таким подходом является машинное (автоматизированное) проектирование с помощью современных быстродействующих электронных вычислительных машин (ЭВМ). Широкое и эффективное применение вычислительной техники в народном хозяйстве имеет важное значение для страны и определяется технической политикой нашего государства. Сам факт применения ЭВМ требует сейчас и потребует в будущем того, чтобы в научных основах технологии машиностроения были учтены возрастающие требования автоматизированного проектирования. Возникает определенная взаимосвязь между научными основами технологии машиностроения и автоматизированным проектированием. Автоматизированное проектирование технологических процессов в первую очередь должно базироваться на научных основах технологии машиностроения, которые в свою очередь по мере выявления закономерностей, разработки правил, определения количественных зависимостей, отображающих протекание технологического процесса и математизации (формализации) при автоматизированном проектировании, получают дальнейшее развитие.

Автоматизированное проектирование в настоящее время развивается по пути решения двух основных взаимосвязанных проблем: ускорения

проектных работ при минимальных затратах и повышения экономической эффективности проектируемых технологических процессов путем их оптимизации по определенным критериям с обеспечением высокого качества изготавливаемых изделий. Вторая проблема является наиболее сложной и менее изученной. Её решение и реализация имеет большое значение сейчас, когда страна вступила в новую пятилетку высокой эффективности и качества. Эта проблема затрагивает новое научное направление — методологию автоматизированного проектирования, связанную с дальнейшим развитием научных основ технологии машиностроения, повышением экономической эффективности разрабатываемых технологических процессов путем их оптимизации и обеспечением высокого качества изготавливаемых изделий.

Цель работы и объект исследования. Настоящая диссертация посвящена решению указанных проблем автоматизированного проектирования и созданию нового научного направления. Её целью является разработка основных научных положений и методики автоматизированного проектирования технологических процессов обработки деталей в машиностроении с обеспечением высокого качества изготавливаемых изделий и повышением экономической эффективности разрабатываемой технологии. Основной задачей настоящих исследований явилось выявление закономерностей, разработка научно-обоснованных правил и методики оптимизации при автоматизированном проектировании технологических процессов обработки деталей.

Данное исследование выполнено применительно к проектированию технологических процессов обработки машиностроительных деталей (ступенчатых валов, зубчатых колес, фланцев, корпусов и др.). Эти детали являются типовыми и самыми распространенными в различных отраслях машиностроения. Основное внимание в диссертации уделено построению технологических процессов обработки деталей резанием в условиях серийного производства, имеющего большой удельный вес в машиностроении.

Методы исследования. Применялись теоретический и экспериментальный методы. Теоретический включал синтез расчетно-аналитического и статистического методов исследования точности; математическое моделирование при проектировании технологического процесса обработки деталей с использованием методов исследования операций, математической логики, теории множеств и статистического анализа. Экспериментальный метод предусматривал определение количественных зависимостей, отображающих протекание технологических процессов обработки

деталей; проверку разработанных математических моделей на их адекватность действительному технологическому процессу.

Научная новизна. В результате проведенных исследований были разработаны основные научные положения и методика автоматизированного проектирования технологических процессов обработки деталей в машиностроении, направленные на обеспечение высокого качества изготавливаемых изделий и повышение экономической эффективности проектируемой технологии. Указанные исследования позволили создать новое научное направление — методологию автоматизированного проектирования, связанную с дальнейшим развитием научных основ технологии машиностроения. Выявленные закономерности, разработанные научно-обоснованные технологические правила и методика оптимизации способствуют дальнейшему развитию научных основ технологии машиностроения, их более широкому использованию при автоматизированном проектировании. Проведенные исследования дали возможность установить пути повышения качества изделий и направление поиска наилучшего варианта технологического процесса по критериям эффективности (оптимальности) и установленным ограничениям. Выполненная работа позволила сформулировать и проанализировать критерии эффективности; учесть значимость локальных критериев и их влияние на поведение целевых функций при многокритериальной оптимизации; разработать систему ограничений по доминирующим факторам, влияющим на построение станочных операций, с обеспечением высокого качества изготавливаемых изделий. Разработанная методика построения оптимальных операций устанавливает направленную комплексную взаимосвязь параметров, характеризующих качество изделия, режимов резания и критериев эффективности, а также определяет закономерность уменьшения погрешностей заготовки при ее обработке. На основе предложенного научно-методического подхода стало возможным проведение работы по типизации технологических процессов на стадии автоматизированного проектирования. Весь комплекс решенных в диссертации вопросов определяет ее научную новизну.

Практическая ценность. В работе доказано, что автоматизированное проектирование способствует повышению качества обрабатываемых деталей. Разработка технологического процесса проводилась путем оптимизации по предложенной методике, которая позволяет находить пути повышения качества изделий и определять направление поиска наилучшего варианта на каждом уровне проектирования. Существующие тенденции дальнейшего развития работ по типизации и стандартизации в технологии

машиностроения подтвердили правильность выбранных предпосылок, направленных на рациональное сочетание типовых (учитывавших передовой производственный опыт) и индивидуальных (учитывавших оптимизацию при разработке технологии или конкретные производственные условия) решений на всех уровнях автоматизированного проектирования технологического процесса обработки детали. Важным практическим выходом явилась типизация технологии в процессе автоматизированного проектирования. При решении проблемы повышения качества изделий в процессе автоматизированного проектирования операций оптимизация отдельного перехода и всей их совокупности при обработке поверхности позволила определить технологические допуски, величины промежуточных припусков, режимы резания и необходимые экономические показатели. Получены рекомендации для прогнозирования ожидаемой точности обработки в конкретных производственных условиях и определения рациональной области применения оборудования при автоматизированном проектировании. Разработанная методика автоматизированного проектирования гибка и легко адаптируется к различным условиям обработки деталей, учитывает развитие научных основ технологии машиностроения и передового производственного опыта. На базе выполненной работы созданы научно-методические материалы, которые стали содержанием нового курса лекций "Автоматизация проектирования технологических процессов", читаемого студентам МВТУ им. Баумана.

Реализация работы в промышленности. Результаты данной работы использованы при внедрении автоматизированного проектирования технологических процессов обработки деталей на ряде машиностроительных предприятий страны. Выполненные и реализованные в промышленности разработки автоматизированного проектирования технологических процессов были экспонированы на выставках: "АСУ — технология '74" (ноябрь 1974г. ВДНХ); "Система технологической подготовки производства" (май-июнь 1975 г. ВДНХ).

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на всесоюзных, республиканских, городских, вузовских научно-технических конференциях и семинарах, посвященных научным основам технологии машиностроения и автоматизации проектирования технологических процессов. Работа докладывалась на научно-технической конференции в ГДР.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 12-ти опубликованных работах, включая две монографии [1], [2] и изданную

в ГДР книгу [3].

Структура и объём работы. Диссертация изложена на 314 страницах машинописного текста, иллюстрируется рисунками и таблицами на 115 страницах (175 рис. и 36 табл.); состоит из введения, семи глав, заключения и основных выводов, списка литературы из 217 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Основные направления автоматизации проектирования технологических процессов. Постановка задачи исследования. (Глава I)

Возможность автоматизированного проектирования технологических процессов определяется, в первую очередь, развитием научных основ технологии машиностроения, математических методов, технических средств, а также уровнем техники программирования. От того какие технологические основы закладываются при проектировании, какова их практическая и научная ценность, будет зависеть степень совершенства разработанного технологического процесса, который во многом определяет качество изделия.

Развитие технологии машиностроения как науки в последнее десятилетие шло по пути решения ряда проблем, главной из которых является изучение закономерностей протекания технологических процессов, выявление наиболее эффективных параметров повышения качества изделий и интенсификации производства. Решение этих проблем базируется на использовании научных направлений ряда школ. Здесь известная роль отводится расчетно-аналитическому методу определения точности обработки (работы Кована В.М., Комиссарова В.И., Корсакова В.С., Маталлина А.А., Соколовского А.П. и др.). Особенность этого метода является всесторонний анализ элементарных погрешностей, выявление технологических закономерностей и возможность прогноза получаемой величины суммарной погрешности. Трудности практической реализации этого метода заключены в сложности количественных зависимостей (при традиционном методе проектирования) и их детерминированном характере. Поэтому возникает необходимость в синтезе расчетно-аналитического метода определения точности обработки и методов статистических исследований. В технологии машиностроения важную роль отводят теоретико-вероятностным методам исследования точности, использование которых помогает разработке более совершенных технологических процессов. Результаты исследований, полученные Бородачевым Н.А., Буловским П.И., Гавриловым А.Н. и др. на основе указанных методов, могут служить в качестве математического обеспечения автомати-

зированного проектирования. Выявление технологических закономерностей протекания процессов обработки и их оптимизация с использованием адаптивных систем занимает значительное место в развитии научных основ технологии машиностроения. Работы Балаклина Б.С., Базрова Б.М., Колесова И.М., Соломенцева Ю.М. и др. позволили практически реализовать этот метод оптимизации. Сочетание использования адаптивных систем с автоматизированным проектированием будет способствовать повышению качества обработки деталей. Одним из направлений обеспечения высокого качества изделий считается использование явлений технологической наследственности (работы Дальского А.М., Маталлина А.А., Подзая А.В., Рыжова Э.В., Сулимы А.М. и др.). Недостаточный объем информационного обеспечения не позволяет наиболее эффективно использовать это направление при автоматизированном проектировании.

Повышение экономической эффективности при автоматизированном проектировании технологических процессов во многом обуславливается уровнем их типизации, а в дальнейшем будет определяться и уровнем стандартизации. Типизации технологических процессов, унификации их оснащения уделено большое внимание во многих трудах советских ученых: Балаклина Б.С., Бойцова В.В., Демьянюка Ф.С., Кована В.М., Митрофанова С.П., Соколовского А.П. и др. В последнее время это направление получило дальнейшее развитие. Работы Митрофанова С.П. по теории и практике построения групповых технологических процессов во многом способствуют повышению эффективности серийного производства.

Выбор наилучшего варианта технологического перехода, операции и всего технологического процесса во многом зависит от назначенных режимов резания. Развитие науки о резании металлов в настоящее время направлено на интенсификацию процессов резания, освоение обработки новых материалов, повышение точности обработки и качества поверхности детали, применение средств механизации и автоматизации. Несмотря на имеющиеся большие достижения, отсутствие достаточного количества достоверных взаимосвязей, определяющих условия назначения режимов резания при поиске наилучшего варианта перехода и операции, во многом затрудняет построение технологического процесса. Существующие нормативы по режимам мало увязаны с обеспечением заданной точности обработки, особенно при использовании станков с числовым программным управлением. Важной проблемой обеспечения высокой эффективности разработанных технологических процессов

является также повышение производительности обработки. Теория производительности рабочих машин, разработанная Шаумяном Г.А. и развитая его учениками на основе анализа цикловых и внецикловых потерь времени, позволяет выявить резервы повышения производительности с целью интенсификации процесса обработки.

К настоящему времени решено большое количество отдельных технологических задач методом автоматизированного проектирования. Реализация многочисленных частных технологических задач способствует созданию автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП). И в дальнейшем решение таких задач будет еще играть большую роль, но уже в рамках АСТПП. Создание автоматизированных подсистем технологического проектирования основывается, в первую очередь, на теории построения технологических процессов; теории разработки алгоритмов (работы Бусленко Н.П., Бруевича Н.Г., Горанского Г.К., Гетерина Г.П., Тугу Э.Х., Цветкова В.Д., Adam J., Elmagrabу S.E. и др.); на методах технической кибернетики и прикладной математики, адаптированных к особенностям разработки технологии. Эффективное использование ЭВМ предопределяет выявление достаточно четких закономерностей и разработку правил для формального описания задачи и построения алгоритмов. Над проблемой автоматизированного проектирования технологических процессов работает много коллективов научно-исследовательских институтов, высших учебных заведений и промышленных предприятий страны. Значительное внимание придано исследованиям по автоматизации проектирования и в странах СЭВ. В капиталистических странах работы по автоматизации проектно-конструкторских работ и технологической подготовке производства получили широкое развитие на базе фирм, производящих мощные ЭВМ. Автоматизация проводится по следующим направлениям: информационно-справочные, проектно-конструкторские и опытно-исследовательские работы, технологическая подготовка производства и процессы управления. Большинство известных работ касается главным образом вопросов ускорения технологического проектирования и теории построения алгоритмов. Повышение качества изготавливаемых изделий и экономичности разрабатываемой технологии за счет оптимизации будет во многом способствовать еще большей эффективности автоматизированного проектирования.

Автоматизированное проектирование станочных операций как основных элементов технологического процесса ведется по следующим направлениям: эвристическое моделирование опыта технолога (носит частный характер); использование известного набора переходов и их типовой последователь-

ности с определением режимов резания по нормативным данным (отражено в большом количестве опубликованных работ); построение оптимальных станочных операций с применением методов математического моделирования (работы МВТУ им. Баумана, МАИ, Мосстанкина, Дальневосточного и Таллинского политехнических институтов и др.).

В последнее время появилось много работ по оптимизации режимов резания при обработке деталей на различных станках. Эти работы могут дать еще больший эффект, когда поиск наиболее выгодных режимов резания будет производиться комплексно с построением оптимальных станочных операций. Вопросам оптимизации проектирования технологических процессов обработки деталей достаточно большое внимание уделяют также во многих развитых странах: ГДР, Венгрии, Чехословакии, США, Англии, ФРГ, Франции, Италии, Японии и др.

Проведенный анализ показал, что основные исследования в области автоматизированного проектирования технологических процессов направлены на ускорение и повышение экономической эффективности проектных работ. Априорно считается, что требования по качеству изделий и экономичности разрабатываемой технологии будут выполнены. Однако, практически эти требования выполняются не всегда. Поэтому актуальное значение для дальнейшего развития методологии автоматизированного проектирования имеет проблема обеспечения высокого качества изготавливаемых изделий и повышения экономической эффективности проектируемых технологических процессов по определенным критериям.

В соответствии с указанной целью в данной работе были поставлены следующие задачи:

1. Выявить и проанализировать технологические закономерности расчленения процесса проектирования на взаимосвязанные уровни.

2. Определить количественные зависимости для характерных операций обработки, отображающие протекание технологического процесса. Намечить пути повышения качества изделий и направления поиска наилучшего варианта разрабатываемой технологии. Установить систему ограничений по доминирующим факторам.

3. Сформулировать критерии для построения оптимального технологического процесса; учесть возможность многокритериальной оптимизации, показать влияние значимости локальных критериев, ошибок эксперимента и ограничивающих факторов на характер поведения целевых функций.

4. Выявить и проанализировать общие закономерности, разработать

правила и методику автоматизированного проектирования технологических маршрутов обработки деталей, учитывающие типовые и индивидуальные решения. Разработать методику целенаправленного формирования групп деталей с комплексной заготовкой.

5. Разработать методику построения оптимальной операции. Установить взаимосвязь этапов (уровней) проектирования операции. Определить закономерность уменьшения погрешности заготовки при ее обработке. Найти направленную комплексную взаимосвязь параметров, характеризующих качество детали, режимов резания и критериев эффективности.

6. Провести анализ разработанных технологических правил и методики проектирования с целью подтверждения правильности основных научных положений работы.

7. Определить технико-экономическую эффективность предложенного метода автоматизированного проектирования технологических процессов обработки деталей в машиностроении.

Структурный анализ технологических процессов для автоматизированного проектирования (Глава II)

Проектирование технологических процессов отличается большой сложностью. Оно выполняется в несколько последовательных стадий или на нескольких уровнях. Вначале разрабатывается принципиальная схема технологического процесса. На последующих уровнях (определение видов работ, проектирование технологического маршрута обработки деталей, построение операции) принципиальная схема уточняется и конкретизируется путем детальных технологических расчетов. При автоматизированном проектировании к приемлемому решению подходят за счет выбора наилучшего варианта из множества возможных по оптимизирующим параметрам или критериям эффективности в определенной последовательности на каждом уровне проектирования. На первых уровнях (включая разработку технологического маршрута), когда неизвестны режимы резания, возникает трудность в строгой количественной оценке оптимального варианта. Поэтому используется смысловой логический критерий — мощность множества операций $|M_s| - \min$, где $s = 1, 2, 3$ — уровни проектирования. Хотя мощность множества $C_{s, \text{с.с.о}}$ стремится к максимуму, в нем всегда имеет место определенная совокупность операций C_i , принадлежащая множеству C . При построении операций находят режимы резания, обеспечивающие наилучший ее вариант. Путем использования математического программирования производится направленный поиск варианта. Здесь критерии для оценки оптимального варианта

располагаются не только в последовательности уровней построения операции, но и их "ценности" или "значимости".

Автоматизированное проектирование технологического процесса обработки деталей включает ряд последовательных задач. При обработке деталей, характерные представители которых освоены в производстве, типовые решения, синтезирующие передовой опыт предприятия, отрасли и научные достижения, позволяют автоматизировать проектирование технологических маршрутов обработки деталей. Построение операций ведется согласно технологическому маршруту. Выбор наилучшего варианта операции позволяет уточнить технологический маршрут. Разработка технологических процессов изготовления деталей оригинальной конструкции предусматривает проектирование маршрутов обработки поверхностей и формирование отдельных операций. Технологический маршрут обработки детали в этом случае представляет собой определенную последовательность операций, сформированных из множества переходов обработки поверхностей. Определенная последовательность устанавливается с помощью принципиальной схемы технологического процесса, а также известными типовыми решениями. На уровне проектирования операционной технологии может иметь место построение индивидуальных или групповых операций в зависимости от общности конструктивно-технологических признаков и программы выпуска изделий.

Основными исходными данными для автоматизированного проектирования являются признаки (логические условия), определяющие конструктивные и качественные параметры детали, оговоренные рабочим чертежом и техническими условиями, а также программа выпуска изделий.

Принципиальная схема технологического процесса включает этапы обработки, выполняемые в определенной последовательности. Под этапами обработки подразумеваются совокупности операций, сгруппированных по идентичным требованиям к точности и качеству формируемых поверхностей детали (заготовки). Каждый этап, содержащийся в принципиальной схеме технологического процесса, должен объединять ограниченное количество операций. Так как этапы обработки могут занимать различное взаимное положение, то они должны объединять совокупность операций (или видов работ), сохраняющих порядок следования и взаимосвязи при различном расположении этапов.

Вначале выделяется ряд укрупненных логических условий, участвующих в формировании принципиальной схемы технологического процесса. В дальнейшем в роли этих условий выступают булевы переменные, что

упрощает процесс проектирования. На всех последующих уровнях выделяются свои логические условия, позволяющие выбрать то или иное решение. При расчленении процесса проектирования в первую очередь была установлена взаимосвязь между этапами и видами работ на примере обработки ступенчатых валов сложной конструкции. Были выявлены технологические закономерности и проведен их анализ с помощью граф-схем, путем учета логических условий, соответствующих весу каждой дуги графа. Синтез технологического маршрута обработки детали предусматривал выявление технологических закономерностей и выбор оборудования с учетом его технологических возможностей и габаритных размеров обрабатываемых заготовок.

Технологические основы математического моделирования операций обработки резанием (Глава III)

При разработке математических моделей для выбора наилучшего варианта станочной операции и ее элементов устанавливаются ограничения и выбирается целевая функция. Главными являются ограничения,

по точности размеров, формы и взаимного расположения поверхностей. Кроме того, необходимо обеспечить заданное качество поверхности. Эти ограничения действуют на завершающих технологических переходах. На черновых переходах, когда снимаются большие объемы металла, наиболее важными являются ограничения по стойкости режущего инструмента, прочности инструментального материала, жесткости технологической системы, максимальным значениям глубины резания t_{max} и подачи S_{max} , мощности главного привода станка, усилию, допускаемому механизмом подачи станка, и др.

На точность обработки оказывает влияние ряд факторов: упругие отжатия технологической системы y , размерный износ режущего инструмента u , погрешность установки заготовки на станке ξ_y , погрешность настройки станка на размер Δ_n , тепловые деформации технологической системы Δ_t , геометрические неточности станка и др. В общем виде суммарная погрешность $\Delta_{\Sigma} = f(\Delta_y, \xi_y, \Delta_n, \Delta_u, \Delta_t, \Sigma \Delta \phi)$.

Элементарные погрешности $\Delta_i = [\Delta_y, \Delta_u, \Delta_t, \Sigma \Delta \phi]$ функционально связаны с режимами обработки, т.е. $\Delta_i = \Psi(t, S, V)$. Причем, степень влияния режимов обработки на каждую Δ_i — разная.

Обеспечение высокого качества изделий при автоматизированном проектировании во многом зависит от состава ограничений, учитывающих доминирующие факторы. В технологическое содержание математической модели выбора наилучших вариантов станочных операций включались количественные зависимости, отображающие протекание процесса обработ-

ки и учитывающие выявленные доминирующие факторы, которые влияют на построение операции. Проведены исследования по формированию ограничений в математических моделях, обеспечивающих точность обработки типовых деталей (ступенчатых валов и корпусов) при выполнении основных станочных операций: точения, сверления, растачивания, фрезерования и шлифования.

При обработке ступенчатых валов на гидрокопировальных токарных полуавтоматах для поиска оптимальных параметров обработки заготовок достаточно было использовать последовательную схему обработки, как менее благоприятную по получаемой точности и более простую для расчета.

При сверлении отверстий на станках с ЧПУ основное внимание было обращено на погрешность обработки, связанную с уводом оси инструмента и отклонением межосевых расстояний. Погрешности обработки при сверлении без направления инструмента — разбивку отверстий, увод оси отверстия и начальное смещение оси — определяли аналитически. Полученные аналитические зависимости позволяют на стадии построения оптимальной операции включать их в математическую модель в качестве ограничений.

Были установлены количественные зависимости, определяющие ограничения по точности размера, формы и взаимного расположения основных отверстий корпусных деталей при растачивании на горизонтально-расточном станке без направления расточной скалки. На точность обработки основных отверстий корпусных деталей контурным фрезерованием на станках с ЧПУ влияет ряд погрешностей. Доминирующей является погрешность, связанная с упругим перемещением концевой фрезы. Получены аналитические количественные зависимости для определения погрешности диаметрального размера, межосевых расстояний и расположения осей отверстий. Учитывалась коррекция эквидистанты. Эти зависимости могут быть использованы для расчета точности при фрезеровании и плоского контура. Они определяют ограничения в математической модели, связанные с обеспечением заданной точности обработки.

Шлифование шеек ступенчатых валов при установке их на центрах связано с возникновением погрешности размера и формы. На возникновение доминирующей погрешности — отклонения формы в поперечном сечении основное влияние оказывает динамика процесса. Определялась частота вращения заготовки, необходимая для того, чтобы амплитуда k -ой погрешности формы находилась в пределах допустимой величины

$\Delta f_{\text{пл.д.д.}}$. Данное ограничение используется в математической модели при построении шлифовальной операции.

Полученные количественные зависимости функционально связаны с режимами резания и во многом определяют экономические показатели спроектированных операций.

Одним из важных вопросов при математическом моделировании технологических процессов обработки резанием является качество исходной информации, используемой для разработки математических моделей, т.е. достоверность используемых технологических зависимостей, нормативных данных и экономических показателей. Математические модели содержат количественные зависимости, отражающие закономерности, присущие реальному процессу. Получение таких количественных зависимостей проводилось по следующим направлениям: 1. Проведение экспериментальных исследований. 2. Определение зависимостей аналитическим путем с последующей экспериментальной проверкой. 3. Использование нормативных данных, а также зависимостей, полученных другими исследователями. Приводятся результаты экспериментальных исследований, на основе которых получены или проверены количественные зависимости для определения технологических параметров при точении, контурном фрезеровании и сверлении. Данные экспериментального исследования иллюстрируют типовой подход к решению задачи получения необходимой информации для математических моделей. Использовался классический или факторный эксперимент с соответствующим аппаратом статистического анализа в зависимости от конкретных условий. Проверка гипотез по технологическим соображениям на соответствие информации, полученной из проведенных теоретических разработок и из нормативных материалов, результатам экспериментов осуществлялась путем применения метода статистических гипотез. Обращалось внимание на необходимость строгого обоснования выдвигаемых гипотез.

Для оценки спроектированного варианта технологического процесса и его элементов разработана система, в которой приведены рекомендации по применению критериев и целевых функций для различных уровней и этапов проектирования. Предлагаются критерии и целевые функции для оценки разработанных вариантов технологического процесса, операции, последовательности выполнения технологических переходов в операции, совокупности технологических переходов или одного перехода при обработке поверхности в зависимости от производственно-технических условий. Из системы критериев и целевых функций необходимо было выбрать нужные, а это является сложной задачей многокри-

териальной оптимизации. В реальных технологических задачах выбора решения имеется несколько целей, каждой из которых соответствует свой локальный критерий. Приходится сравнивать критерии эффективности на основе некоторой схемы компромисса, позволяющего учитывать противоречивость критериев (целевых функций). Эта задача может быть интерпретирована, как задача упорядочения в векторных пространствах, а нахождение принципа оптимальности — как задача выбора отношения порядка. Трудность является несоизмеримость критериев; приходится их приводить к одному масштабу измерения. Учитывалась важность или значимость локальных критериев.

Целевые функции: технологическая себестоимость $C_{оп}$ и производительность Q относились к изолированно рассматриваемой операции. Их решение дает сведения о предельных возможностях спроектированной операции, когда отсутствуют ограничения организационного характера. Для исследования поведения этих целевых функций была использована теория производительности рабочих машин, разработанная Г.А. Шаумяном. Проведенные исследования при сверлении и контурном фрезеровании отверстий на станках с ЧПУ показали, что величины $C_{оп\ min}$ и $Q_{\max}$ целиком определяются применяемым инструментом, технологическими возможностями станка и назначенной подачей s . Анализ показывает, что фактор изменения скорости резания $\chi = \frac{V_i}{V_0}$ (V_i , V_0 — принятое и базовое значения соответственно), обеспечивающий $C_{оп\ min}$ или $Q_{\max}$, не зависит от времени на вспомогательные ходы t_x и от внециклоных потерь времени t_e . Исследования показали, что за счет изменения подачи s не обеспечиваются экстремальные значения целевых функций $C_{оп\ min}$ и $Q_{\max}$, которые достигаются путем варьирования скорости резания. Поэтому необходимо назначать максимально допустимую подачу. Снижение технологической себестоимости или повышение производительности за счет интенсификации режимов обработки следует проводить у автоматизированного оборудования, имеющего малые потери времени ($t_x + t_e$). Выполненный анализ поведения двух целевых функций ($C_{оп}$ и Q) при обработке деталей на универсальных станках, полуавтоматах и станках с ЧПУ показал, что в случае использования автоматизированного оборудования высокой стоимости предпочтение дается второму критерию. Его высокая производительность предопределяет экономические условия эксплуатации. Была проведена оценка значимости критериев в различных условиях обработки. Проведено ранжирование критериев и нахождение "веса", показывающих долю локального критерия в глобальном (его относительную значимость). В свою очередь, каждый из рассмотрен-

1205352

них критериев ($C_{оп}$ и Q) можно считать составным обобщенным скалярным критерием. Например, технологическая себестоимость операции $C_{оп}$ учитывает влияние режимов обработки на основное время t_0 и время технического обслуживания t_m . Считалось, что глобальная цель - минимизация $C_{оп}$ - объединяет две локальные цели: уменьшение основного времени $y_1 = t_0$ и уменьшение времени на техническое обслуживание $y_2 = t_m$. Они и выступают в роли локальных критериев. Причем эти локальные критерии y_1 и y_2 носят противоречивый характер - интенсификация скорости резания вызывает уменьшение критерия y_1 и одновременное увеличение y_2 . Проведен анализ влияния ошибки эксперимента по определению параметров обработки, входящих в целевую функцию, на поведение последней. Влияние ограничивающих факторов на оптимальные значения целевых функций и область допустимых решений задачи будут различными. Проведенные исследования на разработанных математических моделях при выполнении операций на универсальных станках, полуавтоматах и станках с ЧПУ позволили проанализировать "соотношение" между рассматриваемой целевой функцией и ограничивающими факторами, имеющими экстремальный характер, как "соотношение" между двумя локальными критериями. Важной информацией явилось и выяснение степени сужения области допустимых решений.

Разработанные математические модели оценивались с точки зрения пригодности их использования для решения технологических задач в определенных производственных условиях. Их оценка проводилась путем статистического анализа по трем направлениям: 1 - сравнение двух методов решения конкретной технологической задачи - путем математического моделирования и традиционным ("ручным") методом; 2 - проверка математической модели на чувствительность; 3 - проверка математической модели на ее адекватность действующему технологическому процессу. Оценка двух различных методов решения технологической задачи, например при построении операции, проводилась путем использования проверки гипотезы соответствия средних значений двух выборок. При использовании детерминированных зависимостей в математических моделях, полученных по усредненным данным, из-за случайных отклонений, имеет место элемент неопределенности, влияющий на величины параметров обработки и целевой функции. Поэтому очень важно было проверять модель на чувствительность к такого рода случайным отклонениям. Разработанная математическая модель также проверялась на адекватность действующему процессу путем статистического анализа на основании следующей гипотезы: отклонение экспериментальных

значений ст расчетных, полученных на ЭВМ, должно быть минимальным и незначительно отличаться от погрешности измерения.

Автоматизированное проектирование технологических маршрутов обработки деталей (Глава IV)

Типизация технологии, синтезирующая передовой опыт предприятия, отрасли и научные достижения, позволяет перейти к формализованному представлению маршрута, разработке алгоритмов и программы для ЭВМ.

В качестве основы автоматизированного проектирования маршрутов были приняты предпосылки, учитывающие рациональное сочетание типовых и индивидуальных технологических решений. Такое сочетание позволяет учитывать особенности предприятий и отрасли, перспективу дальнейшего развития технологии, т.е. предусматривать разработку не только рабочих, но и перспективных технологических процессов. Для предприятий с достаточно высоким уровнем работ по типизации необходимо было выявить закономерности; проанализировать логические условия, влияющие на процесс формирования маршрута обработки детали; разработать математическую модель и алгоритм маршрута обработки, обладающие элементами адаптивности к изменяющимся производственным условиям.

Для данного класса, подкласса (группы или подгруппы) деталей устанавливался, так называемый, обобщенный маршрут обработки, который включал для них характерный перечень технологических операций. Этот перечень являлся упорядоченным и представлял собой множество операций существующих индивидуальных маршрутов. Эти маршруты имели типовую последовательность и содержание. Причем на уровне предприятия учитывался его передовой опыт и традиции, а также научно-технические достижения и перспективы развития отрасли. Если имеется множество индивидуальных маршрутов $M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_j, \dots, M_n$ (где $1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, n$ - номера индивидуальных маршрутов) для какой-то группы деталей, то при объединении этих маршрутов в обобщенный: $M_y^* \supset M_i$, т.е. обобщенный маршрут M_y^* включает индивидуальные M_i . Причем число объединенных маршрутов должно стремиться к максимуму, т.е. $M_y^* = \bigcup_i M_i$, где $n \rightarrow \max$. Объединение маршрутов характеризует область пересечения данных множеств при вхождении их в обобщенный маршрут. Необходимым условием включения индивидуального маршрута в обобщенный является наличие области пересечения, например M_i и M_y^* , как не пустого множества. $M_i \cap M_y^* \neq \emptyset$. Важной характеристикой (критерием эффективности) формирования обобщенного маршрута является

мощность пересечения множеств индивидуальных маршрутов $|M_{пер}|$, т.е. количество одинаковых (эквивалентных) операций, входящих в это пересечение $|M_{пер}| = \bigcap_{i=1}^n M_i$ ($i=1, 2, \dots, n$); $|M_{пер}| \rightarrow \max$.

Мощность пересечения в обобщенном маршруте должна стремиться к максимуму. Это будет основным условием объединения нескольких индивидуальных маршрутов в обобщенный. Тогда мощность обобщенного маршрута $|M_{г}^*| = \bigcup_{i=1}^n M_i$ ($i=1, 2, \dots, n$) $\rightarrow \min$.

$|M_{пер}|$ и $|M_{г}^*|$ служат критериями для анализа и совершенствования работ по типизации технологических процессов на предприятии.

При проектировании маршрута обработки необходимо было определить перечень операций и последовательность их выполнения. Для обеспечения однозначности операции последняя включала описание сущности выполняемой работы. Код операции характеризует вид операции и учитывает особенности ее выполнения. В результате анализа описаний операций создавался справочник формулировок операций. Для каждой операции выявлялись условия, которые будут определяющими при ее включении в технологический маршрут. Разрабатывался справочник логических условий выбора операций, которые по своему назначению подразделялись на ряд групп, учитывавших геометрические разновидности обрабатываемых поверхностей; вид заготовок; допускаемые погрешности размера, формы и взаимного расположения поверхностей; качество поверхности; габаритные размеры детали (заготовки) и размер партии деталей при обработке. Выбор операций по логическим условиям, зависящим от допустимых отклонений взаимного расположения поверхностей, непосредственно связан с назначением типовой схемы установки заготовки, которая оговаривается текстом формулировки операции и ее кодом. В общем случае элементарная логическая функция выбора k -ой операции

$$f_k = \bigvee_{j=1}^{n_2} \left(\bigwedge_{i=1}^{n_1} A_i \right)_j,$$

где A_i — условие из справочника логических условий для группы деталей; $i=1, 2, \dots, n_1$ — количество условий, связанных логическим произведением; $j=1, 2, \dots, n_2$ — количество сочетаний, связанных логической суммой. Каждое условие элементарной логической функции является элементом множества условий A , т.е. $A_k \in A$. Тогда логическая функция, определяющая обобщенный маршрут

$$\Phi = \bigvee_{k=1}^{n_3} \left\{ \bigvee_{j=1}^{n_2} \left(\bigwedge_{i=1}^{n_1} A_i \right) \right\}_k.$$

Знак $\bigvee_{k=1}^{n_3}$ в логической функции обобщенного маршрута показывает, что

в индивидуальные технологические маршруты могут входить или не входить отдельные операции ($\ell = 1, 2, \dots, n_3$).

Формирование обобщенного маршрута начинается с базового маршрута M . В него последовательно вставляются недостающие операции всех присоединяемых маршрутов согласно разработанному алгоритму, условно разбитому на три части: основной, расстановки и компоновки. Для этого производится поиск эквивалентных операций в базовом маршруте для каждой операции присоединяемого маршрута. Вставляемые недостающие операции занимают определенные места в базовом маршруте. Эвристическая модификация метода инверсии (аддитивный поиск) позволяет однозначно выделить операции из присоединяемого маршрута.

Построение индивидуальных технологических маршрутов осуществляется путем их выделения из обобщенного. Для каждого кода операции $C_k \in f_k \neq \emptyset$, входящего в индивидуальный маршрут M_i , выполняется условие: существует хотя бы один такой набор логических условий $\Lambda_j = (\bigwedge_{i=1}^{n_1} A_i)_j$, который является подмножеством всех наборов f_k для данного кода, т.е. $\forall C_k \{ M_i [\exists \Lambda_j (\Lambda_j \subseteq f_k)] \}$. Тогда условием вхождения k -ой операции обобщенного маршрута в индивидуальный технологический маршрут будет $\Lambda_{jk} \in \Lambda_j$, где Λ_j - набор логических условий, характерных для конкретной детали.

На стадии проектирования технологического маршрута для каждой операции происходит выбор оборудования, приспособлений и инструментов по логическим условиям, характеризующим обрабатываемую деталь. Создаются справочники логических условий по выбору оборудования и оснастки. В результате проектирования ЭВМ выдает технологическую документацию принятого образца. Особенности разработанной методики автоматизированного построения маршрутов является возможность совершенствования и развития работ по типизации в процессе проектирования технологий. Данная подсистема обладает элементами адаптивности к различным производственным изменениям. Рассмотренный метод позволяет производить "обучение" подсистемы по мере появления новых методов обработки, оборудования и технологической оснастки или их совершенствования. При построении оптимальных станочных операций имеется возможность обратной связи с выходом на коррекцию технологического маршрута, т.е. "обучения" разработанной подсистемы в процессе проектирования.

Выбор индивидуальных и формирование комплексных заготовок (Глава V)

На уровне проектирования технологического маршрута происходит

предварительный выбор индивидуальной заготовки по ряду признаков или логических условий, определяющих метод ее получения и габаритные размеры. Предусматривается следующий уровень выбора заготовки, который позволяет уточнить ее вариант. В основу алгоритма положена методика выявления возможности применения различных методов и способов получения заготовки с последующим выбором одного или нескольких из них как наиболее технически оправданных, с использованием таблиц применимости. Окончательный вариант заготовки выбирается по суммарным затратам, связанным с изготовлением и обработкой заготовки.

Основным средством уменьшения технологически неоправданных напусков на заготовки является применение прогрессивных методов получения заготовок. Однако в мелкосерийном производстве для изготовления заготовок часто нецелесообразно применять дорогостоящие оборудование и оснастку. В этих условиях можно применять индивидуальные заготовки с большими напусками (например, из проката) или группировать подобные детали по конструктивным, технологическим и размерным признакам и изготавливать для них заготовки при использовании дорогостоящей оснастки (например, штампов). При любом объединении ставится задача отыскать такую заготовку для произвольной группы деталей, чтобы из нее можно было изготовить определенную номенклатуру деталей, различающихся между собой в определенных пределах по конфигурационным и размерным признакам, и чтобы суммарные затраты на заготовку и на черновые технологические переходы обработки резанием всей группы деталей были ниже, чем при их изготовлении из индивидуальных заготовок.

Замена одного типа заготовки другим вызывает количественное изменение обрабатываемого напуска, что, в свою очередь, приводит к изменению денежных затрат на черновые переходы обработки резанием, которые зависят от режимов резания, количества переходов (рабочих ходов) и других технологических параметров. Основное влияние на них оказывают технические данные оборудования, характеристика режущего инструмента и размеры заготовки. В рассматриваемом случае отсутствуют ограничения на точность обработки и шероховатость поверхности. Это позволяет ограничить на упругие отжатия элементов технологической системы рассматривать в той мере, в какой это необходимо для достижения нормального процесса обработки. Перечисленные ограничения выражались через технологические параметры переходов и соответствующие величины, характеризующие протекание процесса обработки.

Для улавливания значений подачи и скорости резания с паспортными данными оборудования, на котором они устанавливаются дискретно, использовались коэффициенты геометрических рядов подач и частот вращения шпинделя. Так как глубина резания является одним из неизвестных параметров, то оценить то или иное сочетание подачи, глубины и скорости резания можно по технологической себестоимости на удаление единичного объема металла. Установлена и экспериментально подтверждена количественная взаимосвязь числа технологических переходов (рабочих ходов) от величины удаляемого напуска. Были разработаны математическая модель алгоритма и программа для ЭВМ, которая состоит из нескольких самостоятельных блоков. Первый из них предназначен для определения коэффициентов ограничений, зависящих от конкретных условий обработки. Второй блок представляет собой программу целочисленного симплекс-метода. В последнем блоке корректируются полученные значения параметров обработки в зависимости от длины обработки и элементов вспомогательного времени.

Важным условием эффективного использования комплексной заготовки является достаточно большое количество деталей в группе. Разработан метод, в основу которого заложены следующие предпосылки:

1. Все множество типоразмеров деталей, исследуемых на предмет группирования, является упорядоченным по какому-нибудь одному из основных размерных параметров (например, по наибольшему диаметру);
2. Разбивка по этому параметру через определенные интервалы приводит к образованию микрогрупп, включающих детали с установленным изменением размерного параметра;
3. Возможные варианты группирования образуются как различные сочетания определенного числа смежных микрогрупп.

По изложенной выше методике были разработаны алгоритм и программа формирования комплексной заготовки для ЭВМ, опробованные в промышленности, с помощью которых можно выявить закономерности изменения экономии денежных затрат, времени обработки и металла от количества деталей в группе и их размеров. Разработанная методика формирования групп деталей с комплексной заготовкой в условиях мелкосерийного производства позволяет увеличивать размер партии заготовок, применять прогрессивные методы получения заготовок, уменьшать величину напуска и снижать затраты на выполнение черновых переходов при обработке резанием.

Построение оптимальных станочных операций (Глава VI)

Построение оптимальной станочной операции включало три уровня (этапа): поиск оптимального маршрута обработки поверхности детали,

назначение оптимальной последовательности обработки поверхностей и формирование операции. Новым подходом при решении этой важной задачи явилась направленная комплексная взаимосвязь параметров, характеризующих качество детали (точность размера, формы и взаимного расположения поверхностей; шероховатость поверхности), с построением экономичной операции и установлением закономерности уменьшения погрешности заготовки в процессе обработки. Оптимизация отдельного перехода и всей совокупности при обработке поверхности позволила определить технологические допуски, величины промежуточных припусков, режимы резания, нормы времени, настроечные размеры и необходимые экономические показатели. Поиск оптимального маршрута обработки поверхности проводился путем учета доминирующих элементарных погрешностей, позволяющих определить количество технологических переходов, необходимых для достижения заданной точности и шероховатости. На основе выявленных закономерностей и разработанных правил определена оптимальная последовательность и оптимальное объединение переходов при их выполнении, учитывающих обеспечение точности изготавливаемого изделия и экономической эффективности проектируемой операции. С точки зрения механизма возникновения погрешности обработки метод автоматического получения размеров отнесется к более сложным и общим. Поэтому в основу оптимизации обработки положены закономерности этого метода.

При формировании маршрутов обработки поверхности детали учитывались основные факторы, которые определяли количество технологических переходов. Выявлены их количественные изменения и их направление. Проанализированы факторы, зависящие (упругие отжатия технологической системы, размерный износ инструмента и его тепловые деформации и др.) и не зависящие (погрешность установки, геометрические погрешности станка и др.) от режимов обработки. Разработанные диаграммы отклонений размеров во времени служили основой для расчета и выбора схемы обработки с обеспечением "направления" изменения размеров. Условия, определяющие многопереходную обработку, представлялись в двух видах: 1 - при наличии копирования погрешностей, когда упругие отжатия технологической системы являются доминирующим фактором; 2 - при отсутствии копирования погрешностей, когда упругие отжатия технологической системы не являются доминирующим фактором. При расчете фактических глубин резания учитывались вид и расположение поверхности, заданные глубины резания, упругие перемещения технологической системы, погрешность настройки станка на размер,

погрешность установки, совместное влияние размерного износа и тепловых деформаций инструмента и геометрические неточности станка.

При многопереходной обработке каждый предыдущий переход существенно влияет на последующий, главным образом на точность обработки. Поэтому различные варианты выполнения последующего перехода могут рассматриваться только после того, как выбраны определенные параметры предшествующего. Различные варианты многопереходной обработки должны рассматриваться как отличные друг от друга по количеству и основным характеристикам набору переходов, выполняемых в строго определенной последовательности. Каждый такой набор дает определенную точность обработки и связан с конкретными затратами. Вариант выполнения первого перехода оказывает большое влияние на количество вариантов последующих переходов в первую очередь за счет глубины резания. Количество вариантов на последующих переходах будет тем больше, чем больше та часть припуска, которая осталась неиспользованной после первого перехода. Вариант первого перехода в сочетании с различными вариантами выполнения второго перехода дает определенный набор неравнозначных вариантов двухпереходной обработки. Аналогично определяются возможные варианты по третьему, четвертому и т.д. переходам. Варианты многопереходной обработки описываются графом, вершины которого соответствуют какому-нибудь показателю обработки (точности, денежным затратам и т.д.), а ребра, соединяющие две вершины, — определенным параметрам (режимам резания) перехода. Среди определенного множества цепей графа, построенного для конкретного случая обработки, необходимо отыскать цепь, удовлетворяющую ограничениям и дающую экстремальное значение целевой функции. На черновых переходах учитываются ограничения по мощности привода станка; допускаемой нагрузке на инструмент; стойкости инструмента, жесткости технологической системы, усилии, допускаемому механизмом подачи станка, и др. На последнем переходе необходимо обеспечить допуск на размер $\Delta z_i \leq \delta_p$, допускаемую погрешность формы обрабатываемой поверхности $\Delta f_i \leq \Delta f_{\text{доп}}$, высоту неровностей $R_{z_i} \leq R_{z \text{ доп}}$ (или $R_{a_i} \leq R_{a \text{ доп}}$). Режимы обработки p_i и s_j лежат в границах величин паспортных данных станка. В каждом конкретном случае отдельные ограничения не учитываются, если они не активны. Направление расчетов от вариантов обработки за наименьшее число переходов в сторону увеличения количества переходов до прекращения расчетов по достижении экстремального значения целевой функции, дает возможность значительно сократить время работы ЭВМ, потребное для определения оптимального варианта многопереходной обработки. Приведенные положения разра-

ботаны для определения оптимального маршрута обработки поверхностей, общий припуск на которую задан, и когда необходимо рассчитать промежуточные и общие припуски.

При построении оптимальной операции определялась последовательность обработки совокупности поверхностей детали. В зависимости от схемы построения станочной операции последовательность может охватывать обработку одновременно нескольких поверхностей (например, обработку ступеней вала) или только отдельных поверхностей (например, гладких отверстий при сверлении, зенкеровании и развертывании). В первом случае векторы рабочего хода и учитываемого вспомогательного (при перемещении инструмента от одной поверхности к другой) хода параллельны, во втором случае они перпендикулярны. Могут быть также и комбинированные варианты. Разработана методика, представляющая собой совокупность технологических правил, с помощью которых определяется оптимальная последовательность обработки ступеней вала при токарной обработке. Общая технологическая закономерность определения оптимальной последовательности обработки поверхностей, когда векторы рабочего хода и учитываемого вспомогательного хода перпендикулярны, связана с использованием станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр". При оптимизации последовательности обработки поверхностей в качестве целевой функции выбрано вспомогательное время, зависящее от времени холостых перемещений инструмента. Была проанализирована структура вспомогательного времени и получены общая и частные формулы для его расчета в зависимости от содержания выполняемых переходов, технологических возможностей станка и его конструктивных особенностей. Нахождение оптимальной последовательности обработки отверстий в корпусных деталях проводилось по разработанным математическим моделям и алгоритмам на базе метода "ветвей и границ".

Определение последовательности выполнения переходов обработки поверхностей детали на многопозиционных станках связано с рядом ограничений (закрепление переходов за определенными позициями, очередность выполнения переходов и возможность совмещения нескольких переходов на одной позиции). Разработана система страничений, исходя из опыта эксплуатации токарных вертикальных многошпиндельных полуавтоматов, позволяющая объединять обработку различных поверхностей детали на позиции. Распределение переходов по позициям проводилось по разработанному алгоритму с учетом указанных выше ограничений. Распределяя переходы по позициям, необходимо иметь какой-то

выигрыш, например, равномерность загрузки на всех позициях или повышение точности обработки. Например, при обработке на вертикальных полуавтоматах крутящий момент $M_{кр}$ от действия сил резания, вызывая отжатия фиксатора, смещает стол относительно инструмента, и на чистовых позициях возникает погрешность диаметрального размера $\Delta \mu_{сиг} = A_c M_{кр}$, где A_c — коэффициент, характеризующий условия обработки. Необходимо было минимизировать целевую функцию $\Delta \mu_{сиг}$. Это достигалось путем решения задачи о назначении. Находилось определенное сочетание пары частоты вращения шпинделя и подачи суппорта (n_i, s_j) на каждой рабочей позиции полуавтомата в пределах области допустимых решений $(n_i, s_j) \in \bigcup_{k=1}^K R_k$, где $k=1, 2, \dots, n$ — число рабочих позиций, R_k — множество пар n_i, s_j на k -ой позиции.

При формировании оптимальной операции необходимо было объединить выполнение переходов того или иного количества поверхностей на одном станке. Для этого надо общую совокупность переходов упорядочить и разбить на множества с учетом ряда групп ограничений, аналогичных при распределении переходов по позициям многопозиционных станков. По схеме последовательного анализа в результате сравнения определяется доминирование одних вариантов над другими. После этого устанавливалось технологическое правило отсеивания вариантов, позволяющее в итоге строить несложную схему решения с учетом вышеприведенных групп ограничений, а также ограничений $\Delta \varepsilon_i \leq \delta_p$, $\Delta \varphi_i \leq \Delta \varphi_{доп}$ и требования по обеспечению допустимого отклонения взаимного расположения обрабатываемых поверхностей $\Delta n_{pi} \leq \Delta n_{p, доп}$. Варианты формирования операции обработки по предложенной методике для ряда моделей станков оцениваются по приведенным затратам. Таким образом, если известен технологический маршрут обработки детали, то возможна его корректировка по составу и содержанию отдельных операций, а также по моделям используемого оборудования и конструкции оснастки.

В результате многовариантного проектирования операций формируется направленный граф возможных вариантов технологического процесса обработки детали. Задача исследования этого графа может быть приведена к решению с помощью алгоритма Келли. В основе алгоритма лежит расчет максимального потока в сети.

При автоматизированном проектировании станочных операций предусматривался рациональный синтез индивидуальных (полученных путем оптимизации) и типовых (учитывающих передовой опыт промышленности) решений. Причем полученные индивидуальные решения могут быть использованы как типовые.

Анализ результатов применения разработанных научно-обоснованных технологических правил автоматизированного проектирования маршрутов и станочных операций обработки деталей (Глава VII).

Использование разработанной методики автоматизированного проектирования технологических маршрутов позволило не только оценить, но и поднять уровень работ по типизации на предприятии. Применение разработанных технологических правил позволило уменьшить количество операций, входящих в обобщенный маршрут. Анализ разработанных обобщенных маршрутов при обработке ступенчатых валов, корпусных и др. деталей для ряда машиностроительных предприятий показал, что за счет этого уменьшения трудоемкость и денежные затраты процесса автоматизированного проектирования снижаются на 20-40%. Этот эффект зависит от уровня работ по типизации и группы сложности деталей.

Анализ результатов применения разработанных технологических правил, основные научные положения которых изложены в гл. II, III и VI, проводился применительно к построению оптимальных операций при обработке деталей на универсальных станках, полуавтоматах и станках с числовым программным управлением (ЧПУ). В разработку оптимальных операций входило: анализ факторов, влияющих на построение операций; разработка математических моделей, алгоритмов и программ для ЭВМ мод. "Минск-32" и серии "ЕС"; проверка разработанных математических моделей на чувствительность влиянию случайных факторов; экспериментальная проверка адекватности математических моделей действительным технологическим процессам; проведение исследования с помощью математических моделей для разработки типовых решений и определения оптимальных условий эксплуатации оборудования; анализ полученных результатов и их сравнение с результатами, полученными традиционным ("ручным") методом проектирования.

При обработке ступенчатых валов на универсальных токарных станках и основных отверстий в корпусных деталях на горизонтально-расточных станках без направления режущего инструмента были определены условия многопереходной обработки. Установлена зависимость числа технологических переходов от допуска на диаметральный размер поверхности детали, величины общего припуска на обработку поверхности, соотношения геометрических параметров ступенчатых валов и основных отверстий и др. факторов. Получены оптимальные схемы обработки ступенчатых валов и основных отверстий в зависимости от их конструктивного оформления и требуемой точности отдаленных поверхностей. Определены области рационального использования оборудования.

Результаты математического моделирования операций при обработке ступенчатых валов на токарных гидрокопировальных полуавтоматах и деталей типа зубчатых колес на токарных вертикальных многошпиндельных полуавтоматах позволили выявить влияние допуска на размер заготовки, допуска на выполняемый размер, высоты неровностей поверхности детали, жесткости технологической системы и числа деталей, обрабатываемых между подналадками, на количество возможных вариантов обработки, производительность и выбор оптимального варианта операции. Математическое моделирование при построении станочной операции на вертикальных полуавтоматах позволило производить целенаправленное выравнивание действующих сил резания. Это обеспечило уменьшение погрешности обработки диаметральных размеров на 10-20%. Были проведены исследования с помощью математических моделей построения оптимальных операций при обработке отверстий в корпусных деталях на станках с ЧПУ. Они дали возможность определить влияние допуска межосевого расстояния на производительность при сверлении; влияние длины вылета инструмента, угла наклона обрабатываемой поверхности заготовки, начального смещения оси отверстия и глубины сверления на величину допуска межосевого расстояния. Получены области, в которых обеспечивается повышение производительности обработки контурным фрезерованием по сравнению с растачиванием. Установлена закономерность изменения технологической производительности от величины допуска на диаметральный размер при контурном фрезеровании и растачивании. Оптимальная последовательность обработки отверстий в корпусных деталях находилась с помощью алгоритмов, разработанных путем использования метода "Ветвей и границ" и его модификации "Ветвление вправо". Расчеты, проведенные на ЭВМ, и их производственная проверка показали, что вспомогательное время сокращается до 20-25%.

Разработанные и реализованные на ЭВМ математические модели и алгоритмы проектирования технологических маршрутов и операций проверялись в производственных и лабораторных условиях и подтвердили правильность основных научных положений работы.

Экономическая эффективность от автоматизации проектирования технологических процессов определялась по известной методике. Рассчитывались трудоемкость, денежные затраты и срок окупаемости единовременных затрат при выполнении работ по проектированию технологических маршрутов и операций. Была установлена экономическая эффективность оптимизации станочных операций методом математического моде-

лирования на ЭВМ при реализации их в производстве. Эта экономическая эффективность характеризовалась повышением производительности оборудования на 15-30%, снижением технологической себестоимости операции на 10-25% и условным годовым эффектом от эксплуатации оборудования. Результаты проведенных исследований по автоматизированному проектированию технологических маршрутов и станочных операций были использованы на Московском заводе автоматических линий им. 50-летия СССР, Кнжно-Уральском машиностроительном заводе, станкостроительном заводе "Красный Пролетарий" им. Ефремова, автозаводе им. Лихачева и на др. предприятиях с получением экономического эффекта.

Заключение и основные выводы

В результате проведенных исследований разработаны основные научные положения и новая методика автоматизированного проектирования технологических процессов обработки деталей в машиностроении, направленная на обеспечение высокого качества изготавливаемых изделий и повышение экономической эффективности проектируемой технологии. Эти положения и методика основаны на выявленных закономерностях, разработанных правилах и оптимизации технологических процессов. Указанные исследования позволили создать новое научное направление — методологию автоматизированного проектирования, связанную с дальнейшим развитием научных основ технологии машиностроения, повышением эффективности разрабатываемых технологических процессов путем их оптимизации с обеспечением высокого качества изготавливаемых изделий. Получила дальнейшее развитие теория построения и методы расчета технологических процессов вследствие нового подхода, позволяющего осуществлять направленную комплексную взаимосвязь обеспечения высокого качества изделий, режимов резания, типизация и критериев эффективности на более строгой математической основе. В работе показана перспектива развития автоматизированного проектирования во взаимосвязи с основными задачами технологии машиностроения. Исходя из проведенных исследований, были сделаны следующие основные выводы.

1. Использование метода автоматизированного проектирования с оптимизацией по определенным критериям является объективной необходимостью дальнейшего развития технологии машиностроения и наиболее полно позволяет решать проблему обеспечения высокого качества изготовления изделий, повышения экономической эффективности технологических процессов и ускорения подготовки производства.

2. Выбор варианта технологического процесса следует осуществлять

на основе оптимизации по предложенной методике, обеспечивающей поиск наилучшего варианта на каждом уровне автоматизированного проектирования и повышение качества изготавливаемого изделий.

3. Автоматизированное проектирование технологического процесса позволяет наиболее полно проводить исследование множества допустимых вариантов и оценивать их по принятым критериям эффективности. Для этого нужно выполнять последовательное уточнение результатов, полученных на определенных уровнях проектирования, учитывать особенность каждого уровня и взаимосвязи, существующие между ними.

4. Разработанная методика автоматизированного проектирования определяет технологическое содержание математических моделей. В технологическое содержание математической модели выбора наилучших вариантов станочных операций необходимо включать сформулированные критерии эффективности, количественные зависимости, отображающие протекание реального технологического процесса и учитывающие выявленные доминирующие факторы, которые влияют на построение операции.

5. Исходя из основной задачи автоматизированного проектирования — обеспечения высокого качества обрабатываемых деталей и повышения экономической эффективности разрабатываемых технологических процессов, — надлежит сформулировать и проанализировать критерии эффективности на каждом уровне проектирования. Согласно предложенной методике на первых уровнях (включая построение маршрута обработки детали) оценку оптимальности нужно вести по смысловому логическому критерию, в качестве которого следует принимать мощность множества операций. На уровне построения операции, когда становятся известными режимы резания, возникает необходимость в многокритериальной оптимизации, проведение которой должно основываться на выработке принципа оптимальности, учете значимости локальных критериев и влияния ограничивающих факторов на поведение целевых функций.

6. Для уменьшения трудоемкости технологических разработок и более полного учета различных производственных ограничений автоматизированное проектирование должно проводиться на базе предпосылок, позволяющих в более значительной степени обеспечить рациональное сочетание типовых и индивидуальных технологических решений. Построение технологических маршрутов обработки деталей применительно к предприятиям, располагающим достаточно высоким уровнем работ по типизации, следует осуществлять с помощью предлагаемого универсального метода. Этот метод дает возможность в одном алгоритме объединить проектирование маршрутов обработки деталей различных классов (под-

классов или групп) на основе обобщенного маршрута, включающего упорядоченный, минимально необходимый перечень операций.

7. Предложенную методику автоматизированного целенаправленного формирования по многим конструктивно-технологическим параметрам групп деталей с комплексной заготовкой можно рекомендовать для использования в условиях мелкосерийного производства, что может способствовать увеличению партии заготовок, применению прогрессивных методов получения заготовок, уменьшению напуска и снижению затрат на выполнение черновых переходов при обработке резанием.

8. Автоматизированное проектирование оптимальной станочной операции предлагается проводить посредством исследования множества допустимых вариантов операций путем построения технологических переходов и их последующего анализа и синтеза. При этом необходимо учитывать все доминирующие факторы, которые обуславливают построение переходов и операций; предусматривать направленную комплексную взаимосвязь параметров, характеризующих качество детали, режимов резания и критериев эффективности.

9. Решение проблемы повышения качества изготавливаемых изделий в процессе автоматизированного проектирования нужно осуществлять по разработанной методике, позволяющей в большей степени сочетать расчетно-аналитический метод и статистический анализ точности и методы многопараметрической оптимизации. В этом случае оценивается количественно получаемая погрешность обработки на каждом шаге поиска наилучшего варианта технологического перехода и операции.

10. Выполненные исследования рекомендуются для использования в целях повышения уровня типизации технологических маршрутов и операций обработки деталей на стадии автоматизированного проектирования и создания новых научно-обоснованных типовых технологических решений.

11. Спроектированные оптимальные операции обработки деталей на универсальных станках, полуавтоматах и станках с ЧПУ обеспечивали заданное качество изделий при экстремальном значении целевой функции. Предложенную методику построения оптимальных операций следует использовать технологическим службам предприятий с целью прогнозирования ожидаемой точности обработки и определения рациональной области применения оборудования в конкретных производственных условиях.

12. Автоматизированное проектирование по сравнению с традиционным ("ручным") методом позволяет снизить трудоемкость разработки

технологических процессов в 3-10 раз и более, уменьшить денежные затраты в 2-3 раза и более. Предлагаемая методика построения оптимальных операций позволяет повысить производительность обработки на 15-30% и снизить технологическую себестоимость на 10-25% при обеспечении или повышении заданного качества изготавливаемых изделий.

13. Разработанные научные рекомендации, опробованные на ведущих предприятиях страны: станкостроительном заводе "Красный Пролетарий" им. В.И.Ильина, Московском заводе автоматических линий им. 50-летия СССР, автозаводе им. Лихачева и др., могут быть использованы в автоматизированных подсистемах проектирования технологических процессов механической обработки деталей на машиностроительных предприятиях.

14. Предложенная методика может быть использована для автоматизированной разработки технологических процессов изготовления специфических деталей машин при наличии в достаточном объеме закономерностей проектирования технологии и количественных зависимостей, отображающих протекание процесса обработки.

15. На основе выполненной работы созданы научно-методические материалы, ставшие содержанием нового курса лекций "Автоматизация проектирования технологических процессов", читаемого студентам специальности "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты" МВТУ им. Баумана согласно учебному плану, утвержденному Министерством высшего и среднего специального образования СССР. Этот курс лекций может быть предложен для чтения студентам аналогичных специальностей других вузов страны.

Основное содержание диссертации изложено в
следующих работах:

1. Ускорение технологической подготовки механосборочного производства. М., "Машиностроение", 1972, 256 с.
2. Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ. М., "Машиностроение", 1976, 288 с.
3. *Rationelle Fertigungsvorbereitung Methoden Veb Verlag Technik, Berlin, 1975, 132 s.*
4. Технология производства типовых деталей и узлов машин. Валин. В учебнике "Основы технологии машиностроения" под ред. проф. В.С. Коржакова. Издание 2-ое. М., "Машиностроение", 1965, с.393-415.
5. Точность обработки при бесцентровом шлифовании. В сб. "Вопросы точности в машиностроении" под ред. проф. В.М. Кована. М., Машгиз, 1960,

с.17-43.

6. Автоматизация проектирования технологических процессов механической обработки. В сб. "Автоматизация операций проектирования процессов машиностроения". М., "Наука", 1970, с.97-108.

7. Применение электронно-вычислительных машин для проектирования технологических процессов механической обработки. "Справочник технолога машиностроителя", Том I. М., "Машиностроение", 1972, с.564-574.

8. Оснащение приспособлениями технологического процесса обработки при автоматизированном проектировании. "Вестник машиностроения", 1975, № 2, с.72-76.

9. Методика подбора групп деталей с комплексной заготовкой (соавтор О.Ф.Полтавец). "Вестник машиностроения", 1968, №9, с.57-60.

10. Технологические основы оптимизации станочных операций. Материалы II Всесоюзной научно-технической конференции "Автоматизация технической подготовки производства в машиностроении", часть I, ИТК АН БССР, Минск, 1972, с.116-117.

11. Автоматизированное проектирование операций на станках с числовым программным управлением. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности программного управления в машиностроении". Таш.ПИ, Ташкент, 1974, с.42-47.

12. Технологические основы автоматизации проектирования процессов механической обработки. Тезисы IV Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции "Научные основы автоматизации производственных процессов в машиностроении и приборостроении". Секция "Проектирование технологических процессов с применением ЭЦВМ". МВТУ им. Баумана, Москва, 1975, с.12-16.