

Г. К. ГОРАНСКИЙ



**РАСЧЕТ
РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ
ПРИ ПОМОЩИ
ЭЛЕКТРОННО-
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
МАШИН**

Г. К. ГОРАНСКИЙ

РАСЧЕТ
РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ
ПРИ ПОМОЩИ
ЭЛЕКТРОННО-
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
МАШИН

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО БССР
Редакция научно-технической литературы
МИНСК 1963

ОТ АВТОРА

В настоящей книге изложены результаты работы по автоматизации процессов определения оптимальных режимов резания на металлорежущих станках с помощью электронных цифровых автоматических машин.

Эта работа является частью более крупного исследования, имеющего целью полную автоматизацию процессов проектирования технологических процессов в машиностроении и автоматизацию проектирования агрегатных станков и автоматических линий.

Работы в этом направлении проводятся автором в Вычислительном центре АН БССР.

В книге изложены методы получения математических моделей оптимальных режимов резания для одноинструментной работы на универсальном или специальном станках и на многоинструментном агрегатном станке или автоматической линии, методы получения алгоритмов для этих случаев и приведены сами алгоритмы.

На основе этих алгоритмов при помощи методов теории программирования могут быть получены рабочие программы применительно к любой цифровой автоматической машине: «Урал», «Минск», «Стрела» и машинам других типов.

Автор не сомневается в том, что излагаемые в настоящей книге методы автоматизации расчета оптимальных режимов резания не свободны от недостатков и при практическом использовании могут быть значительно улучшены и дополнены.

В связи с ограниченным объемом книги в нее не вошли таблицы констант, показателей степеней и технических характеристик, а также рабочие программы, необходимые при практическом использовании

метода. Эти таблицы при наличии запросов будут высылаться Вычислительным центром АН БССР.

Автор выражает глубокую благодарность М. Д. Чигир и Л. Б. Родцевичу за большую помощь при подготовке к изданию данной книги.

Все замечания и корреспонденцию по вопросам, затронутым в настоящей книге, автор просит направлять по адресу: Минск, Ленинский проспект, 70, Вычислительный центр АН БССР.

ВВЕДЕНИЕ

Принятая XXII съездом КПСС Программа Коммунистической партии Советского Союза с большой научной глубиной и силой раскрывает закономерности и задачи создания материально-технической базы коммунизма, указывает на исключительно важную роль дальнейшего мощного прогресса науки и техники как основы роста производительных сил.

«Коммунизм обеспечивает непрерывное развитие общественного производства и повышение производительности труда на основе быстрого научно-технического прогресса, вооружает человека самой совершенной и могущественной техникой, поднимает на огромную высоту господство людей над природой, дает возможность все больше и полнее управлять ее стихийными силами».

Программа КПСС, определяя задачи партии в области экономического строительства, указывает основные направления научно-технического прогресса и в числе их комплексную автоматизацию и механизацию производства, без которых невозможно развитие ни одной области современной техники.

Программа партии говорит о том, что в течение 20 лет осуществится в массовом масштабе комплексная автоматизация производства со все большим переходом к предприятиям и цехам-автоматам. Ускорится внедрение высокосоввершенных систем автоматического управления. Предусматривается широкое применение кибернетики, электронных, счетно-решающих и управляющих устройств в производстве, при научных исследованиях, в проектно-конструкторской практике, плановых расчетах, в сфере учета, статистики и управления.

Организация различных видов деятельности предприятий, проектных организаций и научных учреждений должна быть подготовлена к широкой механизации многих процессов конструкторских и проектных работ, планирования, учета и к автоматизации различных процессов умственного труда вообще.

Широкое применение в различных отраслях производства и деятельности человека найдут различные самонастраивающиеся, самообу-

чающиеся и самоорганизующиеся системы и устройства управления, позволяющие автоматически вести технологические и другие процессы по оптимальному режиму с максимальной экономической и технической эффективностью. В настоящее время созданы необходимые предпосылки и возможности для решения разнообразных и сложных задач, возникающих в связи с широким внедрением автоматизации в различных отраслях науки и техники, в том числе и автоматизации процессов умственного труда.

Современные автоматические вычислительные машины позволяют производить колоссальные по объему вычислительные работы и сложные логические действия в исключительно короткие сроки.

Можно, например, широко использовать вычислительные методы для выбора оптимальных вариантов решения различных инженерных и экономических задач, во многих случаях применить строгие формальные решения взамен приближенных решений или сложных экспериментов, использовать вычислительные машины для автоматического управления производственными процессами.

Однако успешное применение современных вычислительных машин для автоматизации управления производственными процессами и инженерной деятельности возможно только при упорной и систематической работе по изучению и математическому описанию процессов, подлежащих автоматизации, по созданию математических моделей данных процессов. Необходима также большая исследовательская работа для создания и совершенствования алгоритмов реализации этих математических моделей с помощью быстродействующих автоматических вычислительных машин.

В настоящей работе использованы современные универсальные цифровые вычислительные машины для автоматизации процессов выбора оптимальных режимов резания разными инструментами на металлорежущих станках различных типов, в том числе на многоинструментных агрегатных станках и автоматических станочных линиях.

На основе известных закономерностей процессов резания металлов на металлорежущих станках получены математические модели этих процессов в виде систем линейных алгебраических уравнений и неравенств и разработаны алгоритмы нахождения оптимальных режимов резания для заданных конкретных производственных условий.

На основании этих алгоритмов могут быть разработаны рабочие программы для любой универсальной цифровой автоматической вычислительной машины типа «Урал», «Минск», «Стрела», «БЭСМ» и машин других типов.

Полученные результаты могут быть использованы как для непосредственного расчета оптимальных режимов резания для станков и автоматических линий при их эксплуатации или проектировании, так и для автоматического управления работой металлорежущего оборудования, участков и цехов, для создания различных автоматических станков и систем, самонастраивающихся на оптимальные режимы резания.

Кроме того, полученные результаты позволяют создать на их основе несложные моделирующие устройства как для расчета оптимальных режимов резания, так и для исследования (моделирования) различных вариантов осуществления процесса резания.

Определение оптимальных режимов резания представляет одну из частных задач в процессе проектирования технологических процессов в машиностроении, специальных, агрегатных станков и автоматических линий, при проектировании машиностроительных заводов.

Однако во всех перечисленных выше случаях проектирования определение оптимальных режимов резания является первой и основной частью проекта, на основе которой производится разработка всего проекта.

Режимы резания служат в большинстве случаев основой для разработки кинематики станка — чисел оборотов, чисел ходов, величины подачи; динамики станка — мощности электромотора, усилий, возникающих при резании, величин крутящих моментов на шпинделях и валах станка, прочности и жесткости отдельных деталей и узлов станка и т. д.

На основе выбранных режимов резания устанавливается периодичность и порядок смены режущих инструментов, расход инструментов, определяется число работающих, фонды зарплаты, число станков, необходимых для выполнения заданной программы, площади цехов и участков, необходимые капиталовложения и многие другие элементы организации и экономики производства.

В связи с этим особо важное значение приобретает правильный выбор действительно оптимальных режимов резания, обеспечивающих наибольший экономический эффект с учетом, по возможности, всех факторов, влияющих на производительность, технические качества и экономику производства.

Необходимо отметить, что определение оптимальных режимов резания в такой постановке является весьма сложной технико-экономической вариационной задачей, требующей огромного числа вычислений даже для сравнительно простых с технической точки зрения случаев обработки.

Поэтому при проектировании даже сложных объектов, таких, как автоматические линии, стоимостью в несколько миллионов рублей, до настоящего времени применяются простейшие приближенные методы без учета многих факторов. В ряде случаев режимы резания назначаются по аналогии с уже выполненными конструкциями станков и автоматических линий или определяются экспериментально без учета условий работы станка у потребителя.

В подавляющем большинстве случаев определяется какой-либо один технически возможный режим без серьезного его технико-экономического анализа. Сравнительно редко определяется оптимальный режим резания, так как это требует большого объема вычислений при переборе нескольких вариантов обработки.

Во многих случаях в практике пользуются технически и экономически не обоснованными опытно-статистическими нормами, далеко не отражающими оптимальных режимов резания. В связи с изложенным нет никакой уверенности в том, что при назначении режимов резания перечисленными выше методами выбран действительно оптимальный режим, обеспечивающий в конкретных технико-экономических условиях данного производства наибольший экономический эффект с соблюдением всех технических требований.

Это обстоятельство является одной из причин того, что промышленность иногда выпускает нерентабельные станки и автоматические линии, строит нерентабельные цехи и заводы, которые при эксплуатации не обеспечивают ожидаемого от их внедрения экономического эффекта или заданной производительности.

В настоящее время созрели и всем предшествующим развитием науки и техники подготовлены условия для разработки и широкого внедрения в промышленность методов автоматического определения с большой скоростью оптимальных режимов резания при проектирова-

нии металлорежущего оборудования и технологических процессов в машиностроении.

Появление быстродействующих цифровых автоматических вычислительных машин позволяет, с одной стороны, производить с огромной скоростью и высокой точностью сложные и громоздкие вычисления и логические операции, а с другой — полностью автоматизировать ввод в машину исходных данных, либо в виде записи на картах или лентах, либо в виде электрических сигналов от датчиков, устанавливаемых на станке или в цехе. Точно так же автоматизируется и выдача результатов определения оптимальных режимов резания, которые в виде электрических сигналов могут поступать к исполнительным механизмам станков.

Таким образом, современные цифровые вычислительные машины особенно пригодны для определения оптимальных режимов резания как для целей автоматизации проектирования, так и для автоматического управления ходом технологического процесса.

Выше указывалось, что определение оптимальных режимов резания при наличии большого числа различных ограничивающих факторов, влияющих взаимно друг на друга, является сложной вариационной технико-экономической задачей, допускающей бесчисленное множество технически возможных решений, из которых необходимо выбрать одно оптимальное, например, обеспечивающее минимальную себестоимость операции.

Для решения задач такого рода с успехом могут быть применены математические методы теории линейного программирования, предложенные впервые в 1939 году для решения технических задач советским математиком членом-корреспондентом АН СССР Л. В. Канторовичем и получившие в последние два десятилетия широкое практическое применение.

Задачей настоящей работы являлась разработка методов автоматического определения оптимальных режимов резания на базе использования физических закономерностей современной науки о резании металлов, математических методов теории линейного программирования и возможностей современных быстродействующих автоматических вычислительных машин.

Результаты практического использования разработанных методов изложены ниже. Предварительно можно отметить, что процесс расчета оптимальных режимов резания с помощью цифровых вычислительных машин по сравнению с расчетом «вручную» с использованием арифмометров и клавишных счетных машин ускоряется в 300—3000 раз, в зависимости от типа применяемых автоматических вычислительных машин. Это позволяет высвободить для других целей большое число инженерно-технических работников, широко внедрять расчетные технические обоснованные нормы, значительно ускорить процесс подготовки производства, процесс проектирования станка или автоматической линии, снизить себестоимость обработки и повысить качество изделий.

Г л а в а I

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ УРАВНЕНИЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ПРОЦЕССЫ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ ПРИ ВЫБОРЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ

В настоящей главе систематизированы основные методы расчета режимов резания на металлорежущих станках и найдены общие формулы для расчета — единые для различных случаев обработки различными инструментами. Последнее необходимо для создания единой теоретической модели с целью автоматизации процесса определения оптимальных режимов резания.

Возможность создания такой модели базируется на единстве основных принципов построения металлорежущего оборудования, закономерностей, управляющих работой этого оборудования, а также на единстве физических явлений, имеющих место в процессе резания металлов на разных станках и различными инструментами.

А. П. Владзиевский следующим образом определяет понятие автоматической линии, которое достаточно четко характеризует автоматическое технологическое оборудование, в том числе и металлорежущие станки:

«Автоматическая линия — это система устройств для автоматического преобразования посредством различных технологических воздействий исходного материала, автоматически перемещаемого относительно зон таких воздействий с перезакреплением или перебазированием полуфабриката либо непосредственно, либо вместе с несущим его приспособлением».

Приняв это определение, приходим к выводу, что понятие «автоматическая линия» включает в себя не только

цепочку автоматических станков, связанных между собой транспортными устройствами, но и в более широком плане разнообразное оборудование, осуществляющее автоматически производственные процессы или части этих процессов.

Таким образом, при постепенном усложнении оборудования автоматической линией можно на равных основаниях называть и отдельный станок-автомат, осуществляющий многопозиционную или многоинструментальную обработку, и автоматическую линию, как цепочку связанных между собой станков, и, наконец, завод-автомат, на котором полностью автоматизировано производство изделия, начиная от изготовления заготовки и кончая выдачей готовой продукции с автоматическим выполнением всех вспомогательных и транспортных операций.

Г. И. Грановский убедительно доказал, что различные кинематические схемы резания, применяемые в разнообразных металлорежущих станках и выражающие абсолютные движения, воспроизводимые в процессе резания инструментом и обрабатываемым изделием при обработке изделий любой формы, получаются из сочетания двух элементарных движений — прямолинейного и вращательного.

Таким образом, мы приходим к выводу о некотором единстве металлорежущего оборудования. Очевидно, что и закономерности, управляющие работой металлорежущего оборудования или служащие основанием для выбора его параметров, также едины, несмотря на чрезвычайно большое количество различных конструкций и типов станков, их компоновок, модификаций и назначения.

Трудами русских и советских ученых, обогативших науку о резании металлов глубоким и всесторонним исследованием физической сущности процесса резания, доказано, что, несмотря на большое многообразие форм и методов обработки металлов резанием, они подчиняются многим общим законам. Это общие законы природы — физические и химические, проявляющиеся в особых конкретных условиях, которые существуют при отделении срезаемого слоя металла от основной его массы и при затуплении режущих инструментов.

Таким образом, можно считать, что единая теоретическая модель, в общей форме выражающая различные процессы определения оптимальных режимов резания и самые

процессы в их взаимосвязи, приближается к отражению объективной реальности и может служить основой для создания методов автоматизации определения и исследования этих режимов с помощью моделирующих и цифровых вычислительных машин.

Трудность создания такой единой теоретической модели заключается в том, что различные закономерности, характеризующие процессы резания металлов, представляют в большинстве случаев эмпирические зависимости, полученные разными исследователями в разное время и по различной методике. С целью уменьшения по возможности отрицательного влияния этого обстоятельства на результаты вычислений во всей дальнейшей работе мы будем пользоваться нормативами по режимам резания, выпущенными Научно-исследовательским бюро технических нормативов и НИИавтопромом, которые разработаны и составлены по единой методике.

Задачей настоящей главы является анализ и систематизация основных уравнений, характеризующих критерии оптимальности для оценки режимов резания, исследование основных закономерностей, управляющих процессом резания, и технических ограничений, в рамках которых протекает этот процесс.

Система уравнений и неравенств, полученная в настоящей главе, послужит основой для дальнейшего исследования и разработки методов автоматизации определения оптимального режима резания как для одного инструмента, так и для групп инструментов, работающих на станках, автоматических линиях, на участках и в цехах.

УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Настоящая работа ставит своей целью определение режимов резания, при которых себестоимость операции будет наименьшей. Поэтому при определении скоростей резания и в других расчетах необходимо принимать экономическую стойкость резания — $T_{\text{эк}}$.

В некоторых случаях, когда основным критерием оценки режимов резания будет производительность, необходимо при расчетах принимать стойкость наибольшей производительности — $T_{\text{н. пр}}$.

От стойкости инструментов зависит частота периодических остановов станка для смены и подналадки инструментов и отнесенная на одну операцию величина затрат, связанных с простоями станка для этой цели, с восстановлением и заточкой затупившегося инструмента.

Особенно важно правильно определять стойкость при большом числе одновременно работающих инструментов, как это имеет место на агрегатных станках и автоматических станочных линиях. Принимать в этом случае те же стойкости, что и для одноинструментной работы, нельзя, так как при этом значительно возрастут затраты времени и средств, связанные с притуплением, сменой и регулировкой инструментов, и не будут достигнуты требуемые производительность и экономический эффект. Поэтому при определении стойкости и при расчете оптимальных режимов резания необходимо принимать во внимание особенности работы инструментов на различных станках и организацию обслуживания станков.

С методической целью рассмотрим определение экономической стойкости для одноинструментной работы.

Переменная доля себестоимости операции, зависящая от наладки и режима резания, определяется по формуле:

$$\Theta_k = t_{p.x} E_p + \frac{\Sigma_k}{Q}, \quad (1)$$

где Θ_k — переменная, зависящая от наладки и режима резания доля себестоимости операции в коп.;

$t_{p.x}$ — время рабочего хода (или машинное время) в мин;

E_p — себестоимость 1 минуты работы станка и рабочего в коп./мин;

Σ_k — сумма всех затрат за период стойкости, связанных с притуплением инструмента, в коп.;

Q — число деталей, обработанных инструментом за период стойкости, в шт.

В формуле (1) принимаем

$$t_{p.x} = \frac{t_{рез}}{\Lambda} = \frac{L_{рез}}{n s} \cdot \frac{1}{\Lambda}, \quad (2)$$

где $t_{рез}$ — время резания в мин;

$L_{рез}$ — длина резания в мм;

n — число оборотов инструмента или детали в об/мин;

s — подача инструмента в мм/об;

Λ — коэффициент резания, равный $t_{\text{рез}} : t_{\text{р.х.}}$.

В формуле (2) и в дальнейшем изложении принимаем, что обработка происходит в один проход, т. е. глубина резания t равна толщине срезаемого слоя a , что является типичным для массового и крупносерийного производства.

Число оборотов инструмента или детали в минуту равно

$$n = \frac{1000 v}{\pi D},$$

где v — скорость резания в м/мин;

D — диаметр обрабатываемой поверхности или диаметр инструмента в мм.

Скорость резания, зависящая от режущих возможностей инструмента, равна:

$$v = \frac{C_v K_v}{t^{x_v} s^{y_v} T^m}, \quad (3)$$

где C_v — постоянный коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал и условия обработки;

K_v — общий поправочный коэффициент, характеризующий другие условия обработки, равный произведению ряда частных коэффициентов;

x_v — показатель степени при глубине резания в формуле скорости резания;

y_v — показатель степени при подаче в формуле скорости резания;

T — стойкость инструмента в мин;

$m = \frac{1}{\mu}$ — показатель степени в зависимости $v = \frac{C_v}{T^m}$;

μ — показатель степени в зависимости $T = \frac{C_T}{v^\mu}$,

характеризующий интенсивность износа инструмента;

t — глубина резания в мм.

Подставляя в уравнение (1) значения n и v из уравнений (2) и (3), получаем:

$$t_{\text{рх}} = \frac{t_{\text{рез}}}{\Lambda} = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{L_{\text{рез}} \pi D t^{x_v}}{1000 C_v K_v s^{1-y_v}} \cdot T^m = \frac{C^I T^m}{\Lambda}, \quad (4)$$

где

$$C^I = \frac{L_{\text{рез}} \pi D t^{x_v}}{1000 C_v K_v s^{1-y_v}}. \quad (5)$$

Число деталей, обработанных за период стойкости, равно

$$Q = \frac{T}{t_{p.x}} = \frac{T \Lambda}{t_{рез}} = \frac{T \Lambda}{C^I T^m} = \frac{\Lambda}{C^I} T^{1-m}. \quad (6)$$

Сумма всех расходов за период стойкости, связанных с притуплением инструмента, равна в общем случае

$$\Theta_k = P E_p + P_n E_n + \frac{A_{ин}}{i_{зат}} + A_{зат}, \quad (7)$$

где P — время простоя станка за период стойкости при смене и подналадке инструмента в мин;

P_n — время за период стойкости, затрачиваемое наладчиком на смену и подналадку инструмента, в мин;

E_n — зарплата наладчика за 1 минуту с начислениями в коп/мин;

$A_{ин}$ — стоимость нового инструмента в коп.;

$A_{зат}$ — стоимость одной заточки с накладными расходами заточного отделения в коп.;

$i_{зат}$ — количество заточек, допускаемое конструкцией инструмента, включая первичную.

Подставляя в формулу (1) значения $t_{p.x}$ и Q из формул (4) и (6), получаем:

$$\Theta_k = \frac{C^I T^m}{\Lambda} E_p + \frac{\Theta_k C^I}{\Lambda T^{1-m}} = \frac{C^I E_p}{\Lambda} T^m + \frac{\Theta_k C^I}{\Lambda} T^{m-1}. \quad (8)$$

Возьмем производную от Θ_k по T и приравняем ее нулю:

$$\frac{m C^I E_p}{\Lambda} T^{m-1} - \frac{(m-1) \Theta_k C^I}{\Lambda} T^{(m-1)-1} = 0.$$

Сокращая на $\frac{C^I T^{-1}}{\Lambda}$, получаем:

$$T = \frac{1-m}{m} \cdot \frac{\Theta}{E_p}.$$

Замечая, что $m = \frac{1}{\mu}$, получаем окончательную формулу для экономической стойкости в минутах рабочего хода:

$$T_{эк} = (\mu - 1) \frac{\Theta_k}{E_p} = (\mu - 1) \frac{P E_p + P_n E_n + \frac{A_{ин}}{i_{зат}} + A_{зат}}{E_p}. \quad (9)$$

Стойкость наибольшей производительности $T_{н. пр}$ соответствует случаю, когда, пренебрегая расходами на инструмент, стремятся получить наибольшую производительность. В этом случае производительность в связи с притуплением инструмента будет лимитироваться только простоями станка для смены и подналадки инструмента.

Формула для определения стойкости и наибольшей производительности получается из формулы (9), если принять в ней

$$P_n E_n + \frac{A_{ин}}{i_{зат}} + A_{зат} = 0.$$

$$T_{н. пр} = (\mu - 1) P. \quad (10)$$

Формулы (9) и (10) получены для случая работы одним инструментом на одноинструментном станке при условии, что смена и подналадка инструмента производятся наладчиком в рабочее время. При изменении условий смены инструментов в формулы (9) и (10) необходимо вносить изменения.

Если смена инструментов производится в рабочее время рабочим-станочником, то $P_n = 0$

и

$$\mathcal{E}_k = P E_p + \frac{A_{ин}}{i_{зат}} + A_{зат}. \quad (11)$$

Если смена инструментов производится в нерабочее время наладчиком, то $P = 0$

и

$$\mathcal{E}_k = P_n E_n + \frac{A_{ин}}{i_{зат}} + A_{зат}. \quad (12)$$

Обычно $P = P_n$, что и будем принимать в последующих расчетах.

При расчете оптимальных режимов резания при одноинструментной обработке будем для определения расчетных стойкостей инструментов пользоваться формулами (9), (10), (11) и (12).

Правила и формулы для определения расчетных стойкостей при многоинструментной работе на агрегатных станках и автоматических линиях будут изложены ниже, в главе III.

УРАВНЕНИЕ ОЦЕНОЧНОЙ ФУНКЦИИ (КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ) ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СЛУЧАЕВ

Для правильного решения вариационной технико-экономической задачи определения оптимальных режимов резания большое значение имеет выбор критерия оптимальности.

В большинстве случаев при определении режимов резания на металлорежущих, в том числе на агрегатных, станках и автоматических станочных линиях в качестве критерия оптимальности принята себестоимость одной операции или одной детали. Иногда в качестве такого критерия принимается производительность операции. Такие критерии, как капиталоемкость, энергопотребление и т. п., при расчете режимов резания почти не применяются.

В условиях социалистического хозяйства себестоимость продукта наиболее полно отражает количество затраченного на его производство общественно необходимого труда, независимо от времени и места его приложения, т. е. затраты не только живого труда, непосредственно затрачиваемого при эксплуатации станка (труд производственных и вспомогательных рабочих, инструментальщиков, заточников, ремонтников и т. п.), но также и затраты прошлого овеществленного труда, учитываемые амортизацией основных средств производства. Себестоимость учитывает труд, затраченный на добычу топлива, производство электроэнергии, полуфабрикатов, вспомогательных материалов и т. п.

При определении режимов резания мы будем оперировать с заводской себестоимостью, что обеспечивает достаточную для наших целей точность расчетов.

Уравнение для определения критерия оптимальности, как функции от элементов режима резания n , s , t , условимся в дальнейшем называть **оценочной, или целевой, функцией**.

Найдем сначала уравнения оценочных функций для двух переменных.

Работа одним инструментом на одноинструментном станке

Переменная, зависящая от наладки и режима резания доля себестоимости операции равна

$$\Theta_k = t_{\text{рез}} E_p + \frac{\partial_k}{Q}.$$

При работе в один проход, когда толщина срезаемого слоя a равна глубине резания t ,

$$t_{\text{рез}} = \frac{L_{\text{рез}}}{n s}$$

и

$$Q = \frac{T}{t_{\text{рез}}} = \frac{T n s}{L_{\text{рез}}},$$

где во всех случаях, когда в качестве критерия оптимальности принята себестоимость операции, $T = T_{\text{эк}}$ в мин резания.

Подставляя в формулу (1) значения $t_{\text{рез}}$, Q и $T_{\text{эк}}$ из формул (2), (6) и (9), получаем после преобразований:

$$\Theta_k = L_{\text{рез}} E_p \left(\frac{\mu}{\mu - 1} \right) \cdot \frac{1}{n s} = \frac{C'}{n s}, \quad (13)$$

где
$$C' = L_{\text{рез}} E_p \left(\frac{\mu}{\mu - 1} \right). \quad (14)$$

Сравнивая формулы

$$t_{\text{рез}} = \frac{L_{\text{рез}}}{n s}$$

и

$$\Theta_k = \frac{C'}{n s},$$

замечаем, что функциональная зависимость $t_{\text{рез}}$ и Θ_k от n и s одна и та же, формулы отличаются лишь величиной постоянных коэффициентов $L_{\text{рез}}$ и C' .

На основании этого можно сделать важный вывод, который будет особенно полезен в сложных случаях, а именно:

При использовании в расчетах экономических периодов стойкости вариант операционной технологии и режимов резания, обеспечивающий наименьшее штучное время или время цикла, будет одновременно и наиболее экономичным вариантом.

Поэтому в качестве оценочной функции при определении оптимальных режимов резания можно принимать как уравнение себестоимости операции, так и уравнение, определяющее время резания или время цикла.

Метод решения задачи и результат от этого не меняются.

Как будет показано в дальнейшем, при решении задачи о нахождении оптимальных режимов резания ме-

тодами линейного программирования постоянный коэффициент в правой части уравнения оценочной функции не оказывает влияния на решение задачи. Поэтому в дальнейшем, определяя оценочную функцию, мы будем пользоваться формулой (14) для времени резания, внося в нее необходимые изменения в соответствии с особенностями исследуемого процесса обработки. Это значительно упростит вид оценочной функции и облегчит необходимые расчеты.

Таким образом, в качестве оценочной функции при определении оптимальных режимов резания для работы в один проход будем принимать уравнение вида

$$f = \frac{C}{ns}, \quad (15)$$

где C — любой постоянный коэффициент.

Правильность этого положения может быть доказана для любого случая обработки на металлорежущих станках.

Уравнение (15) является уравнением оценочной функции и в том случае, когда в качестве критерия оптимальности принята наибольшая производительность процесса.

Действительно, производительность станка, или число деталей, обрабатываемых в течение часа, равна

$$R = \frac{60 K_{\text{загр}} r_R}{T_{\text{ц}}}, \quad (16)$$

где R — производительность станка в шт/час;

$K_{\text{загр}}$ — коэффициент загрузки станка;

r_R — число деталей, обрабатываемых одновременно на одной позиции, в шт.;

$T_{\text{ц}}$ — продолжительность цикла в мин.

Величина R достигает максимума, если обратная ей величина

$$\frac{1}{R} = \frac{T_{\text{ц}}}{60 K_{\text{загр}} r_R}$$

достигнет минимума.

Произведем преобразования, приняв $\Delta = \frac{t_{\text{рез}}}{t_{\text{р.х}}}$.

$$\frac{1}{R} = \frac{T_{\text{ц}}}{60 K_{\text{загр}} r_R} = \frac{t_{\text{р.х}} + t_{\text{в}}}{60 K_{\text{загр}} r_R} = \frac{t_{\text{рез}}}{60 K_{\text{загр}} r_R \Delta} + \frac{t_{\text{в}}}{60 K_{\text{загр}} r_R},$$

где t_b — сумма всех вспомогательных времен на операцию в мин.

$$\frac{1}{R} = \frac{t_b}{60 K_{\text{загр}} r_R} = \frac{t_{\text{рез}}}{60 K_{\text{загр}} r_R \Lambda} = \frac{L_{\text{рез}}}{60 K_{\text{загр}} r_R \Lambda} \cdot \frac{1}{ns} = \frac{C''}{ns}.$$

Получаем опять функцию того же вида, что и (15).

Если в качестве критерия оптимальности принята наибольшая производительность, то во всех расчетах при определении режимов резания необходимо принимать стойкость наивысшей производительности $T_{н. пр.}$.

В тех случаях, когда обработка производится в несколько проходов, число которых равно $i = \frac{a}{t}$, причем глубина резания t является одним из разыскиваемых параметров оптимального режима резания, уравнение оценочной функции принимает следующий вид:

$$f = \frac{C}{ns t}, \quad (17)$$

где

$$C = L_{\text{рез}} a.$$

В дальнейших расчетах будем принимать в качестве оценочной функции уравнения (15) и (17).

УРАВНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

При расчете режимов резания на металлорежущих станках, в том числе на агрегатных станках и автоматических станочных линиях, необходимо принимать во внимание ряд факторов, действующих в процессе обработки детали и накладывающих ограничения на режимы резания. Назовем эти факторы *техническими ограничениями*.

Для целей последующего расчета влияние технических ограничений на режимы резания необходимо выразить в виде уравнений, представляющих функции от элементов режима резания n , s и t — числа оборотов в минуту, подачи на оборот и глубины резания. Глубину резания t принимаем в большинстве случаев постоянной, равной толщине срезаемого слоя, т. е. принимаем работу в один проход, что типично для массового и крупносерийного автоматизированного производства. Однако полученные ниже формулы в случае необходимости легко могут быть пре-

образованы с учетом необходимости определения и глубины резания t .

Техническими ограничениями могут быть различные элементы технологического процесса, относящиеся к заготовке, — величина припуска на обработку, жесткость заготовки, заданная чистота обработанных поверхностей и другие; к станку — мощность электромотора, наибольшее допустимое усилие подачи, жесткость и прочность узлов и деталей станка; к инструменту — прочность и жесткость инструмента, геометрия, марка твердого сплава и др.

Наряду с техническими могут быть ограничения и организационно-производственного характера — заданная производительность станка, такт поточной или автоматической линии и другие, а также экономические показатели — норма расхода инструмента, расход электроэнергии и т. п.

Поскольку наличие тех или иных ограничений в большинстве случаев снижает эффективность процесса, их необходимо по возможности устранять путем введения различных технологических, конструктивных и организационно-производственных усовершенствований.

Это тем более возможно при проектировании новых процессов или станков, когда можно увеличить прочность, жесткость и виброустойчивость отдельных, вновь проектируемых узлов, повысить жесткость детали за счет рациональной конструкции приспособления, увеличить рабочий диапазон или повысить верхний предел скоростей и подач, ввести независимость ходов отдельных головок и суппортов, улучшить технологию заготовительных процессов и таким образом уменьшить припуск на обработку и улучшить обрабатываемость металла заготовки, изменить геометрию или конструкцию инструмента, способ его направления, применить обильное охлаждение и т. д. При этом всегда необходимо проверять экономическую целесообразность устранения того или иного ограничения.

Таким образом, при расчете оптимальных режимов резания необходимо учитывать минимум ограничений, которые оказалось невозможно или нецелесообразно устранить.

При обработке на металлорежущих станках, в том числе на агрегатных станках и автоматических станочных линиях, наиболее важными ограничениями, которые необходимо учитывать, являются следующие:

1) режущие возможности инструмента, определяемые его материалом, геометрией, расчетной стойкостью и условиями обработки;

2) мощность электромотора привода главного движения станка или силовой головки;

3) заданная производительность станка или ритм работы линии;

4) наименьшая возможная скорость резания (число оборотов), зависящая или от наименьшего числа оборотов шпинделя станка, или от режущих свойств инструмента при обработке того или иного металла;

5) наибольшая возможная скорость резания (число оборотов), допускаемая кинематикой станка или режущими свойствами инструмента;

6) наибольшая подача, допускаемая прочностью и жесткостью станка, инструмента и обрабатываемой детали, а также требованиями к чистоте обработки;

7) наименьшая подача, допускаемая кинематикой станка;

8) наибольшая подача, допускаемая кинематикой станка;

9) наименьшая технологически приемлемая глубина резания для данного инструмента;

10) наибольшая возможная глубина резания, равная припуску на обработку.

Кроме перечисленных, на выбор режимов резания влияют и другие ограничения: жесткость узлов станка, приспособления и обрабатываемой детали, вибрации при резании, нагрев детали, усилие закрепления детали и ряд других.

Многие из этих ограничений могут быть устранены при проектировании станка или технологического процесса, часть же ограничений в настоящее время еще недостаточно хорошо изучена, не поддается расчету и устраняется при экспериментальной проверке режимов резания.

Важнейшим и решающим ограничением является заданная производительность станка или линии, так как никакой режим не может быть признан оптимальным, если он не обеспечивает требуемой производительности.

Составим уравнения технических ограничений для случая работы одним инструментом на одноинструментном станке, а затем распространим полученные результаты на другие случаи обработки.

Ограничение 1. Режущие возможности инструмента. Экономическая скорость резания, т. е. скорость, соответ-

ствующая экономической стойкости, учитывающая режущие возможности инструмента, экономику производства и организацию инструментального хозяйства, определяется для различных инструментов и видов обработки по приводимым ниже формулам:

1. Для резцов при паружном продольном и поперечном точении и при расточке

$$v_{\text{эк}} = \frac{C_v K_v}{t^{x_v} s^{y_v} T_{\text{эк}}^m \left(\frac{H_B}{200} \right)^{n_v}}, \quad (18)$$

при отрезке, прорезке и фасонном точении с поперечной подачей:

$$v_{\text{эк}} = \frac{C_v K_v}{T_{\text{эк}}^m s^{y_v} \left(\frac{H_B}{200} \right)^{n_v}}. \quad (19)$$

2. Для сверл при сверлении глухих и сквозных отверстий в стали с $H_B < 155$

$$v_{\text{эк}} = \frac{C_v K_v D^{z_v} H_B^{n_v}}{T_{\text{эк}}^m t^{x_v} s^{y_v}}, \quad (20)$$

при сверлении в стали с $H_B \geq 155$ и в других металлах

$$v_{\text{эк}} = \frac{C_v K_v D^{z_v}}{T_{\text{эк}}^m t^{x_v} s^{y_v} H_B^{n_v}}. \quad (21)$$

3. Для сверл при рассверливании, для зенкеров и разверток при обработке отверстий в стали с $H_B < 155$

$$v_{\text{эк}} = \frac{C_v K_v D^{z_v} H_B^{n_v}}{T_{\text{эк}}^m t^{x_v} s^{y_v}}, \quad (22)$$

при обработке стали с $H_B \geq 155$ и других металлов

$$v_{\text{эк}} = \frac{C_v K_v D^{z_v}}{T_{\text{эк}}^m t^{x_v} s^{y_v} H_B^{n_v}}. \quad (23)$$

4. Для торцовых и цилиндрических фрез всех типов

$$v_{\text{эк}} = \frac{C_v K_v D^{z_v}}{T_{\text{эк}}^m t^{x_v} s_z^{y_v} z^{u_v} B^{r_v}}. \quad (24)$$

5. При нарезании резьбы метчиками, плашками и самооткрывающимися головками

$$v_{\text{эк}} = \frac{C_v K_v D^{z_v}}{T_{\text{эк}}^m s^{y_v}}. \quad (24')$$

В формулах (18) ÷ (25)

m — показатель степени при $T_{\text{эк}}$;

C_v — постоянный коэффициент, учитывающий влияние на скорость резания обрабатываемого металла и другие факторы;

K_v — общий поправочный коэффициент, характеризующий условия обработки;

D — диаметр инструмента или места обработки в мм;

$T_{\text{эк}}$ — расчетная экономическая стойкость инструмента в минутах резания;

t — глубина резания в мм;

s — подача на оборот в мм/об;

s_z — подача на 1 зуб фрезы в мм/зуб;

z — число зубьев фрезы;

B — ширина фрезерования в мм;

H_B — твердость материала заготовки по Бринеллю;

$x_v, y_v, z_v, n_v, u_v, r_v$ — показатели степеней при переменных в формуле скорости резания.

Сравнивая формулы (18) — (24), замечаем, что все они совершенно идентичны и легко приводятся для всех инструментов к единому виду, а именно:

$$v_{\text{эк}} = \frac{C_v K_v D^{z_v}}{T_{\text{эк}}^m t^{x_v} s^{y_v} \left(\frac{H_B}{K_{H_B}} \right)^{n_v} z^{u_v} B^{r_v}}. \quad (25)$$

Специфика отдельных видов обработки различными инструментами учитывается при помощи поправочного коэффициента K_{H_B} и показателей степеней переменных.

При точении всех видов показатели степеней z_v, u_v и r_v равны нулю, а поправочный коэффициент $K_{H_B} = 200$. Подставляя эти значения в формулу (25), получаем формулы (18) и (19).

При сверлении глухих и сквозных отверстий поправочный коэффициент $K_{H_B} = 1$, показатели степени x_v, u_v, r_v равны нулю, а показатель степени n_v для сталей с $H_B < 155$

принят отрицательным. Подставляя эти значения в формулу (25), получаем формулы (20) и (21).

При рассверливании, зенкерования и развертывании поправочный коэффициент $K_{H_B} = 1$, показатели степени u_v и r_v равны нулю, а показатель степени n_v для сталей с $H_B < 155$ принят отрицательным.

Подставляя эти значения в формулу (25), получаем формулы (22) и (23).

При фрезеровании показатель степени $n_v = 0$. Вместо s — подачи на оборот — в формулу подставляется s_z — подача на 1 зуб фрезы.

Подставляя эти значения в формулу (25), получаем формулу (24).

При нарезании резьбы показатели степеней n_v, x_v, u_v, r_v равны нулю. Подставляя эти значения в формулу (25), получаем формулу (24').

Таким образом, унифицированная формула (25) для определения скорости резания справедлива для всех перечисленных выше случаев обработки металлов резанием различными инструментами.

Общий поправочный коэффициент

$$K_v = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8 K_9 K_{10} K_{11} K_{12} K_{13} K_{14} = \prod_{i=1}^{i=14} K_i, \quad (26)$$

где $K_1, K_2, \dots, K_{14}$ — поправочные коэффициенты, учитывающие влияние различных факторов на скорость резания.

В таблице 1 показано, влияние каких факторов на скорость резания и посредством каких поправочных коэффициентов учитывается при различных видах обработки.

Скорость резания, определяемая кинематикой станка, выражается формулой:

$$v = \frac{\pi D n}{1000}, \quad (27)$$

где D — диаметр обработки или инструмента в мм;

n — число оборотов изделия или инструмента в об/мин.

Приравнивая правые части формул (25) и (27), получаем:

$$\frac{C_v K_v D^{z_v}}{T_{\text{эк}}^m t^{x_v} s^{y_v} \left(\frac{H_B}{K_{H_B}} \right)^{n_v} z^{u_v} B^{r_v}} = \frac{\pi D n}{1000}. \quad (28)$$

Таблица 1

Состав общего поправочного коэффициента K_v , учитывающего влияние различных факторов на скорость резания

Фактор, влияние которого учитывается коэффициентом	Обозначение коэффициента	Вид обработки					
		точение	сверление	зенкерование	развертывание	фрезерование	нарезание резьбы
Поперечное сечение державки резца	K_1	+					
Главный угол в плане	K_2	+				+	
Вспомогательный угол в плане	K_3	+					
Радиус при вершине	K_4	+					
Материал режущей части инструмента	K_5	÷	+	+	+	+	
Способ изготовления обрабатываемого металла	K_6	+	+	÷	+	+	+
Состояние поверхности обрабатываемого металла	K_7	+	+	+	+	+	+
Форма передней грани	K_8	+					
Разность диаметров при прорезке	K_9	+					
Диаметр растачиваемого отверстия	K_{10}	+					
Тип инструмента	K_{11}	+	÷	÷	+	+	+
Характер работы	K_{12}	+	+			+	
Глубина сверления	K_{13}		+				
Наличие и вид охлаждения	K_{14}	÷	÷	+	÷	÷	+

Полученное уравнение устанавливает связь между скоростью резания, определяемой режущими свойствами инструмента, материалом режущей части инструмента, его геометрией, принятой глубиной резания и подачей, механическими и физическими свойствами материала обрабатываемой детали, организацией инструментального хозяйства и экономикой производства, с одной стороны, и скоростью резания, определяемой кинематикой станка, с другой.

Уравнение (28) является одним из основных уравнений для определения оптимального режима резания.

Выделим в левую часть уравнения (28) элементы режима резания, подлежащие определению.

Для случая работы в один проход при заданной глубине резанием имеем:

$$ns^{y_v} = \frac{1000 C_v K_v D^{z_v}}{\pi T_{\text{ЭК}}^m t^{x_v} D \left(\frac{H_B}{K_{H_B}} \right)^{n_v} z^{u_v} B^{r_v}}$$

или

$$ns^{y_v} = \frac{318 C_v K_v}{T_{\text{ЭК}}^m t^{x_v} D^{1-z_v} \left(\frac{H_B}{K_{H_B}} \right)^{n_v} z^{u_v} B^{r_v}}. \quad (29)$$

Для случая работы в несколько проходов, когда глубина резания t также неизвестна, имеем:

$$ns^{y_v} t^{x_v} = \frac{318 C_v K_v}{T_{\text{ЭК}}^m D^{1-z_v} \left(\frac{H_B}{K_{H_B}} \right)^{n_v} z^{u_v} B^{r_v}}. \quad (30)$$

Уравнения (29) и (30) являются основными уравнениями системы, с помощью которой определяются в дальнейшем оптимальные режимы резания.

Ограничение 2. Мощность электродвигателя привода главного движения станка или электродвигателя силовой головки. Крутящие моменты на шпинделе станка, возникающие вследствие наличия окружной силы резания, для разных случаев обработки определяются по формулам:

1. При точении всех видов и растачивании

$$M_{кр} = \frac{P_z D}{2} = \frac{C_z K_z t^{x_z} s^{y_z} H_B^{n_z} D}{2} \text{ кгмм.} \quad (31)$$

2. При сверлении

$$M_{кр} = C_z K_z s^{y_z} D^{z_z} H_B^{n_z} \text{ кгмм.} \quad (32)$$

3. При рассверливании, зенкерования и развертывании

$$M_{кр} = C_z K_z t^{x_z} s^{y_z} D^{z_z} H_B^{n_z} \text{ кгмм.} \quad (33)$$

4. При фрезеровании фрезами всех типов

$$M_{кр} = \frac{P_z D}{2} = \frac{C_z K_z t^{x_z} s^{y_z} D^{z_z+1} z^{u_z} B^{r_z}}{2} \text{ кгмм.} \quad (34)$$

5. При нарезании резьбы метчиками, плашками и самооткрывающимися головками

$$M_{кр} = C_z K_z D^{z_z} s^{y_z} \text{ кгмм.} \quad (35)$$

В формулах (31) ÷ (35)

C_z — постоянный коэффициент, учитывающий влияние на усилие резания обрабатываемого металла и других условий обработки;

$x_z, y_z, z_z, n_z, u_z, r_z$ — показатели степеней при переменных;

K_z — общий поправочный коэффициент, учитывающий условия обработки и представляющий произведение ряда частных коэффициентов.

Сравнивая формулы (31) ÷ (35) замечаем, что они совершенно идентичны и легко приводятся для всех случаев обработки резанием к единому виду, а именно:

$$M_{кр} = \frac{C_z K_z t^{x_z} s^{y_z} D^{z_z} H_B^{n_z} z^{u_z} B^{r_z}}{K_{C_z}}. \quad (36)$$

Специфика отдельных видов обработки учитывается при помощи поправочного коэффициента K_{C_z} и показателей степеней переменных.

При точении всех видов и растачивании показатели степеней u_z и r_z равны нулю, а поправочный коэффициент $K_{C_z} = 2$.

Подставляя эти значения в формулу (36), получаем формулу (31).

При сверлении показатели степеней x_z , u_z и r_z равны нулю, а поправочный коэффициент $K_{C_z} = 1$. Подставляя эти значения в формулу (36), получаем формулу (32).

При рассверливании, зенкерования и развертывания показатели степеней u_z и r_z равны нулю, а поправочный коэффициент $K_{C_z} = 1$.

Подставляя эти значения в формулу (36), получаем формулу (33).

При фрезеровании фрезами всех типов показатель степени $n_z = 0$, а поправочный коэффициент $K_{C_z} = 2$. Вместо подачи на оборот s в формулу подставляется величина подачи на 1 зуб s_z .

Подставляя эти значения в формулу (36), получаем формулу (34).

При нарезании резьбы x_z , n_z , u_z и r_z равны нулю, а $K_{C_z} = 1$.

Подставляя эти значения в формулу (36), получаем формулу (35).

Общий поправочный коэффициент

$$K_z = K_{15} K_{16} K_{17} K_{18} K_{19} = \prod_{i=15}^{i=19} K_i, \quad (37)$$

где $K_{15}, K_{16}, \dots, K_{19}$ — частные поправочные коэффициенты, учитывающие влияние различных факторов на окружное усилие резания.

Крутящий момент на шпинделе станка, соответствующий мощности мотора электродвигателя главного привода станка и числу оборотов шпинделя, равен

$$M_{кр} = \frac{975 \cdot 10^3 N_n \eta}{n} \text{ кгм.м}, \quad (38)$$

где N_n — мощность электродвигателя главного привода станка в *квт*;

η — коэффициент полезного действия передачи от электродвигателя до инструмента;

n — число оборотов шпинделя в *об/мин*.

Сравнивая правые части формул (36) и (38) и учитывая, что крутящий момент на резце вследствие возникающих усилий резания должен быть меньше крутящего момен-

та, развиваемого станком по мощности установленного на нем мотора, получаем:

$$\frac{C_z K_z t^{x_z} s^{y_z} D^{z_z} H_B^{n_z} z^{u_z} B^{r_z}}{K_{C_z}} \leq \frac{975 \cdot 10^3 N_H \eta}{n}. \quad (39)$$

Полученное неравенство устанавливает связь между динамикой резания и динамикой станка и является одним из основных неравенств при определении оптимального режима резания.

В неравенстве (39) перенесем в левую часть элементы режима резания, подлежащие определению.

Для случая работы в один проход, когда глубина резания t задана, имеем:

$$n s^{y_z} \leq \frac{975 \cdot 10^3 K_{C_z} N_H \eta}{C_z K_z t^{x_z} D^{z_z} H_B^{n_z} z^{u_z} B^{r_z}}. \quad (40)$$

Для случая работы в несколько проходов, когда глубина резания t также неизвестна, имеем:

$$n s^{y_z} t^{x_z} \leq \frac{975 \cdot 10^3 K_{C_z} N_H \eta}{C_z K_z D^{z_z} H_B^{n_z} z^{u_z} B^{r_z}}. \quad (41)$$

Неравенства (40) и (41) являются основными неравенствами системы, с помощью которой определяются оптимальные режимы резания.

Ограничение 3. Заданная производительность станка. Продолжительность цикла работы станка или такта автоматической или поточной линии определяется по формуле:

$$T_{\text{ц}} = \frac{60 K_{\text{загр}} r_R}{R}, \quad (42)$$

где $K_{\text{загр}}$ — коэффициент загрузки станка;

r_R — число деталей, обрабатываемых одновременно на одной позиции, в шт.;

R — заданная производительность станка или линии станков в шт/ч.

С другой стороны, время цикла равно

$$T_{\text{ц}} = t_{\text{р.х}} + t_{\text{в}}, \quad (43)$$

где $t_{p.x}$ — время рабочего хода в мин;
 t_b — сумма всех вспомогательных времен при работе станка или линии в минутах, состоящая из:
 времени, связанного с переходом, — t_1 ;
 времени на установку и снятие детали — t_2 ;
 времени на быстрый подвод и отвод головок — t_3 ;
 времени на поворот барабана или стола — t_4 ;
 времени выдержки на упоре — t_5 ;
 времени на очистку приспособления от стружки — t_6 и т. п.

При определении t_b необходимо учитывать возможное совмещение перечисленных выше времен.

Если установка и снятие детали происходит во время рабочего хода, то при расчете принимают

$$t_2 + t_6 = 0.$$

Время выдержки на упоре $t_5 = 0,03 \div 0,10$ мин.

Если выдержки на упоре нет, то $t_5 = 0$.

Время на поворот барабана или стола $t_4 = 0,03 \div 0,2$ мин.

При расчете режимов резания для универсальных станков различных типов принимают

$$t_b = t_1 + t_2.$$

Но так как

$$t_{p.x} = \frac{L_{p.x}}{ns} \quad (44)$$

при работе в один проход

$$\text{и} \quad t_{p.x} = \frac{L_{p.x} a}{n s t} \quad (45)$$

при работе в несколько проходов, то формула (38) преобразуется в формулы (46) и (47).

В уравнениях (44) и (45) s представляет подачу на один оборот изделия или инструмента в мм/об.

При фрезеровании, когда подача задана на 1 зуб фрезы, необходимо ввести в правые части уравнений поправочный коэффициент K_ϕ , равный числу зубьев фрезы.

При других видах обработки резанием $K_\phi = 1,0$.

Получаем:

$$T_{ц} = \frac{L_{p.x}}{K_\phi n s} + t_b \quad (46)$$

при работе в один проход

$$и \quad T_{\text{ц}} = \frac{L_{\text{р.х}} a}{K_{\Phi} n s t} + t_{\text{в}} \quad (47)$$

при работе в несколько проходов.

Сравнивая уравнение (42) с уравнениями (46) и (47) и учитывая, что время цикла, определенное исходя из заданной производительности, должно быть больше времени цикла станка, включающего время на рабочий ход и на вспомогательные операции, получаем:

а) при работе в один проход

$$\frac{L_{\text{р.х}}}{K_{\Phi} n s} + t_{\text{в}} \leq \frac{60 K_{\text{загр}} r_R}{R}$$

и далее

$$n s \geq \frac{L_{\text{р.х}}}{K_{\Phi} \left(\frac{60 K_{\text{загр}} r_R}{R} - t_{\text{в}} \right)}; \quad (48)$$

б) при работе в несколько проходов, когда глубина резания неизвестна,

$$n s t \geq \frac{L_{\text{р.х}} a}{K_{\Phi} \left(\frac{60 K_{\text{загр}} r_R}{R} - t_{\text{в}} \right)}. \quad (49)$$

Неравенства (48) и (49) системы являются основными и служат для определения оптимальных режимов резания.

Ограничение 4. Наименьшая допустимая скорость резания. Скорость резания любым инструментом не может быть меньше некоторой определенной величины v_{min} , так как при чрезмерном занижении ее изменяются и ухудшаются условия стружкообразования, а на режущей кромке появляется нарост, усиливаются выкрашивание и износ режущих кромок инструментов.

Неравенство, соответствующее этому ограничению, имеет вид:

$$n \geq \frac{1000 v_{\text{min}}}{\pi D}, \quad (50)$$

откуда

$$n \geq \frac{318 v_{\text{min}}}{D}. \quad (51)$$

С другой стороны, при работе на универсальном станке число оборотов шпинделя не может быть меньше наименьшего числа оборотов, предусмотренного кинематикой станка, т. е.

$$n \geq n_{\text{ст. min}}. \quad (52)$$

Объединяя неравенства (51) и (52), получаем следующее выражение:

$$n \geq \max \left(\frac{318 v_{\text{min}}}{D}; n_{\text{ст. min}} \right). \quad (53)$$

Неравенство (53) входит в систему для определения оптимального режима резания. При расчете режимов резания для проектируемых специальных станков, когда число оборотов шпинделя может быть взято любым, достаточно ограничиться одним неравенством (51).

Ограничение 5. Наибольшая возможная скорость резания при работе на универсальном станке. Для многих инструментов чистовой и получистовой обработки отверстий скорость резания не может быть больше некоторой величины, определяемой для каждого инструмента на основании практических данных. При значительном увеличении скорости резания за пределы практически допустимой наблюдается быстрая потеря инструментом размера вследствие повышенного износа режущих кромок и разбивания диаметра отверстия обрабатываемой данным инструментом детали.

Все резьбы рекомендуется нарезать при весьма небольших скоростях резания — 14—16 м/мин для метчиков и самооткрывающихся головок и не более 4 м/мин для круглых плашек. Превышение указанных скоростей приводит к разрушению и срыву резбовых ниток, т. е. к браку.

При резании инструментами, имеющими главные углы в плане порядка 90°, во избежание возникновения вибраций также снижают скорость резания.

Неравенство, соответствующее этому ограничению, имеет вид

$$n \leq \frac{1000 v_{\text{max}}}{\pi D},$$

откуда

$$n \leq \frac{318 v_{\text{max}}}{D}.$$

Число оборотов шпинделя не может быть больше наибольшего числа оборотов, предусмотренного кинематикой станка, т. е.

$$n \leq n_{\text{ст. max.}}$$

Общее неравенство, ограничивающее сверху возможные числа оборотов шпинделя, будет:

$$n \leq \min \left(\frac{318 v_{\text{max}}}{D}; n_{\text{ст. max}} \right). \quad (54)$$

Неравенство (54) входит в систему для определения оптимального режима резания.

При расчете режимов резания для проектируемых специальных станков в этом случае достаточно ограничиться лишь нижним пределом по v_{max} .

Ограничение 6. Наибольшая подача, допустимая прочностью или жесткостью инструмента и обрабатываемой детали, условиями размещения стружки в стружечных каналах инструментов, требованиями к чистоте обрабатываемой поверхности и прочностью механизма подачи станка. При черновом точении всех видов величина наибольшей подачи лимитируется главным образом жесткостью державки резца или обрабатываемой детали. Жесткость узлов станка и приспособления всегда может быть увеличена до требуемой степени за счет различных конструктивных мероприятий.

Рассматривая резец, как консоль, нагруженную на конце окружной силой резания P_z , получаем неравенства, выражающие ограничение подачи или подачи и глубины резания по жесткости резца:

а) при работе в один проход

$$s^{yz} \leq K_s \frac{f_p E_{\text{держ}} b h^3}{4 C_z K_z t^{xz} H_B^{nz} l^3} = \alpha'; \quad (55)$$

б) при работе в несколько проходов, когда глубина резания также неизвестна,

$$t^{xz} s^{yz} \leq \frac{K_s f_p E_{\text{держ}} b h^3}{4 C_z K_z H_B^{nz} l^3} = \alpha. \quad (56)$$

Коэффициент K_s в неравенствах (55) и (56) для всех видов точения равен 1,0, а для других видов обработки равен 0. Последнее указывает на применимость неравенств

(55) и (56) только для точения. В случае круглой державки диаметр d принимаем

$$d = b = h.$$

Рассматривая обрабатываемую деталь (вал), как балку, нагруженную сосредоточенной силой P_z , приложенной в точке, вызывающей наибольший прогиб детали (в зависимости от способа закрепления), получаем неравенства ограничений подачи или подачи и глубины резания по жесткости обрабатываемой детали:

$$s^{yz} \leq K_{ж} \frac{f_{заг} E_{заг} D_{заг}^4}{C_z K_z t^{xz} H_{Б^z}^n L_{заг}^3} = \beta' \quad (57)$$

при работе в один проход

$$\text{и} \quad t^{xz} s^{yz} \leq K_{ж} \frac{f_{заг} E_{заг} D_{заг}^4}{C_z K_z H_{Б^z}^n L_{заг}^3} = \beta \quad (58)$$

при работе в несколько проходов, когда глубина резания t также неизвестна.

Коэффициент $K_{ж}$ изменяется в зависимости от способа закрепления обрабатываемой детали на станке:

при закреплении детали в центрах $K_{ж} = 2,4$;

при закреплении детали в патроне и заднем центре $K_{ж} = 5,5$;

при закреплении детали только в патроне $K_{ж} = 0,15$.

Для сверления, зенкерования, развертывания, фрезерования и парезания резьбы коэффициент $K_{ж} = 0$, что указывает на неприменимость неравенств (57) и (58) для этих случаев обработки.

Жесткость обрабатываемой детали при точении может быть увеличена за счет установки люнетов или изменения способа закрепления. При сверлении, зенкерования, фрезерования и т. п. всегда можно заранее обеспечить требуемую жесткость детали за счет установки дополнительных опор в приспособлении или на станке.

В формулах (55) — (58)

b — ширина сечения державки резца в мм;

h — высота сечения державки резца в мм;

d — диаметр круглой державки резца в мм;

f_p — допустимая стрела прогиба резца в мм;

l_p — вылет державки резца из резцовой головки или другой опоры в мм;

$E_{\text{держ}}$ — модуль упругости материала державки резца, равный $20\,000 \div 22\,000 \text{ кг/мм}^2$;

$D_{\text{заг}}$ — диаметр обрабатываемой детали в мм;

$f_{\text{заг}}$ — допускаемая стрела прогиба заготовки в мм;

$L_{\text{заг}}$ — расстояние между точками опоры заготовки или вылет заготовки в мм;

$E_{\text{заг}}$ — модуль упругости материала заготовки в кг/мм^2 .

При чистовом точении наибольшая допустимая величина подачи ограничивается требованиями к чистоте обрабатываемой поверхности.

В тех случаях, когда требуется обработать поверхность заданной чистоты, при определении подачи будем пользоваться формулой:

$$s \leq \frac{C_H H_{\text{max}}^n r^u}{t^x \varphi^z \varphi_1^2}, \quad (59)$$

где $H_{\text{max}} \approx 4H_{\text{ск}}$ — максимальная высота неровности поверхности в мм;

r — радиус при вершине резца в мм;

φ — главный угол резца в плане в град;

φ_1 — вспомогательный угол резца в плане в град.

Из формулы (59) получаем:

а) при работе, когда глубина резания t задана,

$$s \leq \frac{C_H (4H_{\text{ск}})^n r^u}{t^x (\varphi \varphi_1)^z} = \gamma'; \quad (60)$$

б) при работе, когда глубина резания t неизвестна,

$$st^x \leq \frac{C_H (4H_{\text{ск}})^n r^u}{(\varphi \varphi_1)^z} = \gamma. \quad (61)$$

При всех видах обработки отверстий наибольшая допустимая подача лимитируется прочностью стержневого инструмента и условиями размещения стружки в стружечных канавках.

Для определения наибольшей допустимой подачи воспользуемся в этом случае формулой

$$s = K_{23} C_s D^p = \delta' = \delta, \quad (62)$$

где D — диаметр инструмента в мм.

Возможное увеличение подачи при рассверливании и уменьшение ее при глубоком сверлении учитывается поправочным коэффициентом K_{23} . Для точения и фрезеро-

(55) и (56) только для точения. В случае круглой державки диаметр d принимаем

$$d = b = h.$$

Рассматривая обрабатываемую деталь (вал), как балку, нагруженную сосредоточенной силой P_z , приложенной в точке, вызывающей наибольший прогиб детали (в зависимости от способа закрепления), получаем неравенства ограничений подачи или подачи и глубины резания по жесткости обрабатываемой детали:

$$s^{yz} \leq K_{\text{ж}} \frac{f_{\text{заг}} E_{\text{заг}} D_{\text{заг}}^4}{C_z K_z t^{xz} H_B^{nz} L_{\text{заг}}^3} = \beta' \quad (57)$$

при работе в один проход

$$\text{и} \quad t^{xz} s^{yz} \leq K_{\text{ж}} \frac{f_{\text{заг}} E_{\text{заг}} D_{\text{заг}}^4}{C_z K_z H_B^{nz} L_{\text{заг}}^3} = \beta \quad (58)$$

при работе в несколько проходов, когда глубина резания t также неизвестна.

Коэффициент $K_{\text{ж}}$ изменяется в зависимости от способа закрепления обрабатываемой детали на станке:

при закреплении детали в центрах $K_{\text{ж}} = 2,4$;

при закреплении детали в патроне и заднем центре $K_{\text{ж}} = 5,5$;

при закреплении детали только в патроне $K_{\text{ж}} = 0,15$.

Для сверления, зенкерования, развертывания, фрезерования и парезания резьбы коэффициент $K_{\text{ж}} = 0$, что указывает на неприменимость неравенств (57) и (58) для этих случаев обработки.

Жесткость обрабатываемой детали при точении может быть увеличена за счет установки люнетов или изменения способа закрепления. При сверлении, зенкеровании, фрезеровании и т. п. всегда можно заранее обеспечить требуемую жесткость детали за счет установки дополнительных опор в приспособлении или на станке.

В формулах (55) — (58)

b — ширина сечения державки резца в мм;

h — высота сечения державки резца в мм;

d — диаметр круглой державки резца в мм;

f_p — допустимая стрела прогиба резца в мм;

l_p — вылет державки резца из резцовой головки или другой опоры в мм;

$E_{\text{держ}}$ — модуль упругости материала державки резца, равный $20\,000 \div 22\,000 \text{ кг/мм}^2$;

$D_{\text{заг}}$ — диаметр обрабатываемой детали в мм;

$f_{\text{заг}}$ — допускаемая стрела прогиба заготовки в мм;

$L_{\text{заг}}$ — расстояние между точками опоры заготовки или вылет заготовки в мм;

$E_{\text{заг}}$ — модуль упругости материала заготовки в кг/мм^2 .

При чистовом точении наибольшая допустимая величина подачи ограничивается требованиями к чистоте обрабатываемой поверхности.

В тех случаях, когда требуется обработать поверхность заданной чистоты, при определении подачи будем пользоваться формулой:

$$s \leq \frac{C_H H_{\text{max}}^n r^u}{t^x \varphi^z \varphi_1^2}, \quad (59)$$

где $H_{\text{max}} \approx 4H_{\text{ск}}$ — максимальная высота неровности поверхности в мм;

r — радиус при вершине резца в мм;

φ — главный угол резца в плане в град;

φ_1 — вспомогательный угол резца в плане в град.

Из формулы (59) получаем:

а) при работе, когда глубина резания t задана,

$$s \leq \frac{C_H (4H_{\text{ск}})^n r^u}{t^x (\varphi \varphi_1)^z} = \gamma'; \quad (60)$$

б) при работе, когда глубина резания t неизвестна,

$$st^x \leq \frac{C_H (4H_{\text{ск}})^n r^u}{(\varphi \varphi_1)^z} = \gamma. \quad (61)$$

При всех видах обработки отверстий наибольшая допустимая подача лимитируется прочностью стержневого инструмента и условиями размещения стружки в стружечных канавках.

Для определения наибольшей допустимой подачи воспользуемся в этом случае формулой

$$s = K_{23} C_s D^p = \delta' = \delta, \quad (62)$$

где D — диаметр инструмента в мм.

Возможное увеличение подачи при рассверливании и уменьшение ее при глубоком сверлении учитывается поправочным коэффициентом K_{23} . Для точения и фрезеро-

вания $K_{23} = 0$. Это указывает на то, что при этих видах обработки формула (62) неприменима.

При черновом фрезеровании факторами, ограничивающими величину наибольшей подачи на зуб, являются стойкость фрезы, работа без резких вибраций и надлежащая чистота поверхности.

При черновом фрезеровании Гипромаш рекомендует производить расчет подачи на 1 зуб по следующей формуле:

а) при фрезеровании цилиндрическими и концевыми фрезами

$$s_z \leq \frac{C_\Phi D^2 \Phi}{t^{0,5} B^{0,2}} \text{ мм/зуб}; \quad (63)$$

б) при фрезеровании торцовыми фрезами и торцовыми головками подача может быть принята большей и определяется по формуле:

$$s_z \leq \frac{C_\Phi}{t^{1/3}} \text{ мм/зуб}. \quad (64)$$

Формулы (63) и (64) могут быть сведены в единую:

$$s_z \leq \frac{C_\Phi D^2 \Phi}{t^x \Phi B^r \Phi} = \varepsilon' \text{ мм/зуб}. \quad (65)$$

Неравенство (65) входит в систему для определения оптимального режима резания при фрезеровании в один проход.

При работе в несколько проходов, когда глубина резания также неизвестна, неравенство (65) принимает следующий вид:

$$s_z t^{x\Phi} \leq K_{25} \frac{C_\Phi D^2 \Phi}{B^r \Phi} = \varepsilon. \quad (66)$$

Правые части неравенств умножаются на поправочный коэффициент K_{25} , равный 1,0 при черновом фрезеровании и равный 0 при всех других видах обработки, в том числе и при чистовом фрезеровании, что соответствует условию применимости неравенств (65) и (66) только для чернового фрезерования.

При чистовом фрезеровании, когда требуется обеспечить заданную чистоту поверхности, подача на 1 зуб фрезы рассчитывается по формуле:

а) при работе в один проход

$$s_z \leq K_{26} \frac{C_z (4H_{CK})^{n_r} D^{z_r}}{z 4^{x_r}} = \zeta' \text{ мм/зуб}; \quad (67)$$

б) при работе в несколько проходов, когда глубина резания также неизвестна, неравенство принимает следующий вид:

$$s_z t^{x_r} < \frac{K_{26} C_r (4H_{CK})^{n_r} D^{z_r}}{z} = \zeta \text{ мм/зуб}. \quad (68)$$

Коэффициент K_{26} при чистовом фрезеровании равен 1,0, а для других видов обработки, в том числе и для чернового фрезерования, равен 0, что указывает на применимость неравенств (67) и (68) только для чистового фрезерования.

При нарезании резьбы подача всегда равна шагу резьбы, т. е. соблюдается равенство:

$$s = K_{24} S_p = \psi, \quad (69)$$

где S_p — шаг нарезаемой резьбы в мм; $K_{24} = 1,0$, для всех других видов обработки $K_{24} = 0$.

Наибольшая подача, допускаемая прочностью механизма подачи станка или силовой головки. Осевая составляющая усилия резания или усилие подачи при работе различными инструментами определяется по формуле:

1. При продольном и поперечном точении и расточке

$$P_x = C_x K_x t^{x_x} s^{y_x} H_B^{n_x}. \quad (70)$$

2. При сверлении

$$P_x = C_x K_x s^{y_x} D^{z_x} H_B^{n_x}. \quad (71)$$

3. При рассверливании, зенкерования и развертывании

$$P_x = C_x K_x t^{x_x} s^{y_x} H_B^{n_x}. \quad (72)$$

4. При фрезеровании

$$P_x = C_x K_x t^{x_x} s^{y_x} D^{z_x} z^{u_x} B^{r_x}. \quad (73)$$

В формулах (70) и (73)

C_x — постоянный коэффициент для осевой составляющей усилия резания, зависящий от обрабатываемого металла и от условий работы;

$x_x, y_x, z_x, n_x, u_x, r_x$ — показатели степеней для осевой составляющей усилия резания;

K_x — общий поправочный коэффициент на усилие подачи, представляющий произведение нескольких частных коэффициентов K_{20}, K_{21}, K_{22} , учитывающих влияние ряда факторов.

Сравнивая формулы (70) и (73), замечаем, что все они совершенно идентичны и приводятся для всех инструментов к единому виду, а именно:

$$P_x = C_x K_x t^{x_x} s^{y_x} D^{z_x} H_B^{n_x} z^{u_x} B^{r_x}. \quad (74)$$

Специфика отдельных видов обработки различными инструментами учитывается при помощи показателей степеней переменных.

При точении всех видов показатели степеней z_x, u_x, r_x равны нулю. Подставляя эти значения в формулу (74), получаем формулу (70).

При сверлении показатели степеней x_x, u_x, r_x равны нулю. Подставляя эти значения в формулу (74), получаем формулу (71).

При рассверливании, зенкерования и развертывании показатели степеней z_x, u_x, r_x равны нулю. Подставляя эти значения в формулу (74), получаем формулу (72).

При фрезеровании формула (74) остается без изменений и соответствует формуле (73).

Вследствие малой величины усилия подачи при развертывании и нарезании резьбы его значения в этих случаях не определяют.

Усилие подачи, действующее при резании на инструмент, должно быть меньше усилия подачи, допускаемого прочностью механизма подачи станка или силовой головки, т. е. должно всегда соблюдаться неравенство

$$P_x \leq P_{\text{под. ст}} \quad (75)$$

или

$$C_x K_x t^{x_x} s^{y_x} D^{z_x} H_B^{n_x} z^{u_x} B^{r_x} \leq P_{\text{под. ст}}. \quad (76)$$

Полученное неравенство является одним из основных неравенств системы для определения оптимальных режимов резания.

В неравенстве (76) выделим в левую часть элементы режима резания, подлежащие определению.

Для случая работы в один проход, когда глубина резания t задана, получаем:

$$s^{yx} \leq \frac{P_{\text{под. ст}}}{C_x K_x t^{x_x} D^{z_x} H_B^{n_x} z^{u_x} B^{r_x}} = s'. \quad (77)$$

Для случая работы в несколько проходов, когда глубина резания t неизвестна, получаем

$$s^{yx} t^{x_x} \leq \frac{P_{\text{под. ст}}}{C_x K_x D^{z_x} H_B^{n_x} z^{u_x} B^{r_x}} = s. \quad (78)$$

В системе уравнений и неравенств, служащей для определения оптимального режима резания, ограничению 6 соответствует лишь одно неравенство.

Из рассмотренных выше неравенств и уравнений данного ограничения, определяющих оптимальный в заданных условиях режим резания, выбирается неравенство или уравнение, у которого правая часть наименьшая и при этом не равна нулю.

Такой выбор обеспечивает применение наибольших технологически допустимых в заданных условиях величин подачи или сечения стружки.

Ограничение 7. Наименьшая подача, допустимая кинематикой станка. Определенная выше технологически допустимая подача не может быть меньше наименьшей подачи, имеющейся на станке.

Для универсального станка — это минимальная подача на оборот шпинделя $s_{\text{ст. min}}$. Для силовых головок агрегатных станков и автоматических линий — наименьшая минутная подача $S_{\text{м. min}}$.

Таким образом, технологически допустимая подача всегда должна быть больше или равной минимальной подаче, имеющейся на станке, т. е. должны соблюдаться неравенства:

для универсального станка

$$s \geq s_{\text{ст. min}}; \quad (79)$$

для силовой головки

$$S_{\text{м}} \geq S_{\text{м. min}}. \quad (80)$$

Для специального, вновь проектируемого станка, когда подача может быть выбрана любой, ограничение 7 можно не учитывать.

Ограничение 8. Наибольшая подача, допустимая кинематикой станка. Очевидно, что технологически допустимая подача не может быть больше наибольшей подачи, имеющейся на станке или силовой головке, т. е. всегда должны соблюдаться неравенства:

для универсального станка

$$s \leq s_{\text{ст. max}}; \quad (81)$$

для силовой головки

$$S_{\text{м}} \leq S_{\text{м. max}}. \quad (82)$$

Для специального, вновь проектируемого станка ограничение 8 можно не учитывать.

Ограничение 9. Наименьшая, технологически приемлемая глубина резания. Глубина резания t не может быть меньше некоторой определенной для каждого инструмента и обрабатываемого металла величины t_{min} , так как в противном случае процесс резания частично заменяется смятием-выглаживанием срезаемого слоя металла, ухудшается процесс образования стружки, резко возрастает интенсивность износа режущих кромок инструмента, ухудшается качество обработанной поверхности. Поэтому всегда должно соблюдаться неравенство

$$t \geq t_{\text{min}}. \quad (83)$$

Ограничение 10. Наибольшая возможная глубина резания. Глубина резания t не может быть больше припуска на обработку a . Поэтому всегда должно соблюдаться неравенство

$$t \leq a. \quad (84)$$

К числу рассмотренных нами ограничений могут быть добавлены и другие, если имеется возможность выразить их в виде функций от элементов режима резания. Однако приведенные в настоящем параграфе ограничения являются основными, влияющими на выбор режимов резания наиболее существенным образом.

Другие ограничения, как указывалось выше, могут быть легко устранены за счет различных конструктивных, технологических и организационных мероприятий. Поэтому в дальнейшем изложении и при расчете оптимальных режимов мы ограничимся десятью рассматриваемыми нами ограничениями режима резания.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ
ПРИ ОДНОИНСТРУМЕНТНОЙ ОБРАБОТКЕ
НА УНИВЕРСАЛЬНОМ СТАНКЕ**

**ПОЛУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ
УРАВНЕНИЙ И НЕРАВЕНСТВ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ**

В предыдущей главе нами были систематизированы для различных случаев обработки резанием и приведены к единой форме уравнения, характеризующие критерии оптимальности при оценке режимов резания, а также уравнения и неравенства, характеризующие основные технические ограничения процесса резания на металлорежущих станках.

На основе этих уравнений и неравенств может быть решена задача о выборе оптимальных режимов резания в рамках заданных ограничений. В ряде случаев, когда имеющиеся технические ограничения не обеспечивают этих режимов, может быть решена задача о корректировке данных ограничений до их значений, обеспечивающих оптимальность режима резания.

По заданным исходным данным определяются элементы режима резания на металлорежущем станке: число оборотов шпинделя n , величина подачи на 1 оборот изделия или инструмента s или подачи на 1 зуб фрезы s_z и глубина резания t , при которых себестоимость операции была бы минимальной (или производительность максимальной).

Необходимо найти такую комбинацию элементов режима резания (nst), при которой принятый критерий оптимальности достигал бы максимума или минимума, в зависимости от его характера.

Задача должна решаться с учетом имеющихся между отдельными параметрами связей, отражающих физические закономерности при резании металлов, и заданных огра-

ний технологического, технического, организационно-производственного и экономического характера. При этом, как указывалось выше, многие технические и организационно-производственные ограничения по возможности должны устраняться и не лимитировать эффективность режима резания.

Аналитическое решение задачи сводится к определению условий максимума или минимума функции многих переменных, связанных между собой многими ограничивающими зависимостями.

В наших условиях такой функцией будет *оценочная функция*, или уравнение критерия оптимальности.

Для решения задач такого рода Г. И. Темчин предложил методику расчета многоинструментных наладок, основанную на нахождении экстремума функции многих переменных методом множителей Лагранжа. Однако этот метод, вполне оправданный при расчете многоинструментных наладок, когда число неизвестных переменных относительно невелико, не всегда удобен при расчете режимов для автоматических линий и автоматического производства, когда число искомых переменных в связи с большим числом работающих параллельно инструментов может достигать нескольких сотен и более.

Кроме того, метод Лагранжа требует существования частных производных оптимизируемой функции в точке, где достигается экстремум. Значительная же часть функций, с которыми приходится иметь дело при определении оптимальных режимов резания, достигает экстремального значения на границе областей, т. е. там, где частные производные не существуют.

При использовании метода Лагранжа число уравнений должно равняться числу неизвестных, что также не всегда возможно при решении многих задач по выбору оптимальных режимов резания. Метод же подстановок (исключений) при большом числе уравнений и неизвестных настолько усложняет решение, что практически он неприменим.

На основании изложенного мы считали целесообразным применить для нахождения оптимальных параметров режимов резания на металлорежущих станках, на автоматических линиях и агрегатных станках новый метод решения экстремальных задач, получивший широкое практическое применение в последние годы, а именно так называемый *метод линейного программирования*.

Основанием для выбора этого метода являлось также и то, что он достаточно удобен для применения автоматических вычислительных машин при решении систем линейных уравнений и неравенств, с которыми оперируют при данном методе. Это чрезвычайно упрощает и ускоряет решение даже очень сложных и громоздких задач при большом числе неизвестных и ограничивающих условий.

Линейное программирование охватывает методы решения ряда оптимальных задач, имеющих дело со многими взаимосвязанными переменными, подчиняющимися определенным ограничивающим условиям.

Постановку задач линейного программирования можно сформулировать следующим образом.

Имеется некоторая величина, например себестоимость, производительность, капиталоемкость и т. п., являющаяся линейной функцией ряда переменных. Переменные в свою очередь должны удовлетворять ограничениям, выраженным в виде системы линейных равенств или неравенств.

Требуется отыскать такие неотрицательные значения переменных, удовлетворяющие системе ограничений, при которых величина, являющаяся их линейной функцией, принимала бы наименьшее или наибольшее значение.

Сказанное можно записать следующим образом.

Задана система m линейных алгебраических уравнений или неравенств с n переменными, причем $n \neq m$:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1j}x_j + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2j}x_j + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ \vdots & \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mj}x_j + \dots + a_{mn}x_n &= b_m, \end{aligned} \quad (85)$$

и линейная форма f тех же переменных

$$f = C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_jx_j + \dots + C_nx_n. \quad (86)$$

Требуется среди многих возможных решений системы (85) найти такое неотрицательное решение, при котором линейная форма f принимает минимальное (максимальное) значение.

Такое решение будем называть *оптимальным решением* данной задачи.

В настоящее время разработано несколько способов нахождения неотрицательного решения произвольной

системы линейных алгебраических уравнений. Наиболее распространен так называемый *симплексный метод* (метод Данцига).

Однако мы в настоящей работе не ставим целью рассмотрение этих методов, имея в виду, что решение возникающих перед нами задач линейного программирования будет производиться с помощью более удобного метода — графически или с помощью автоматических вычислительных машин.

Таким образом, *аналитическое решение задачи о выборе оптимальных режимов резания всегда возможно при любом числе неизвестных, если имеются ограничивающие условия и зависимости, связывающие эти неизвестные.*

Применение автоматических вычислительных машин позволяет быстро и точно решать громоздкие и сложные задачи, решение которых обычными методами практически немыслимо.

Хотя методы линейного программирования относительно универсальны, но тем не менее учет особенностей каждой конкретной задачи приводит обычно к значительному сокращению трудоемкости вычислений.

Непосредственному решению задачи, как правило, должен предшествовать анализ, позволяющий выявить особенности задачи и определить наиболее рациональный метод ее исследования и возможности упрощения алгоритма этого метода.

Поэтому применение линейного программирования для решения практических задач всегда является творческим процессом.

Для применения методов линейного программирования в целях нахождения оптимальных режимов резания необходимо все уравнения и неравенства технических ограничений, а также уравнения критерия оптимальности, полученные в главе I, преобразовать в линейные формы, являющиеся функциями искомых элементов режимов резания n , s и t . Рассмотрим вначале наиболее общий случай обработки в несколько проходов, когда неизвестны n , s и t , а затем частный случай, когда глубина резания t задана и обработка ведется в один проход.

В предыдущей главе были получены уравнения и неравенства, отражающие взаимосвязи между основными техническими ограничениями процесса резания металлов на станках и элементами режима резания n , s и t .

Для случая обработки в несколько проходов на универсальном станке были получены следующие уравнения и неравенства:

Ограничение 1. Режущие возможности инструмента:

$$n s^{y_v} t^{x_v} = \frac{318 C_v K_v}{T_{\text{ЭК}}^m D^{1-z_v} \left(\frac{H_B}{K_{H_B}} \right)^{n_v} z_v^{u_v} B^{r_v}}.$$

Ограничение 2. Мощность электродвигателя привода главного движения станка:

$$n s^{y_z} t^{x_z} \leq \frac{975 \cdot 10^3 N_H \eta_i K_{C_z}}{C_z K_z D^{z_z} H_B^{n_z} z^{u_z} B^{r_z}}.$$

Ограничение 3. Заданная производительность станка:

$$n s t \geq \frac{L_{\text{п.к}} a}{K_{\Phi} \left(\frac{60 K_{\text{заг.р}} r_R}{R} - t_B \right)}.$$

Ограничение 4. Наименьшее возможное число оборотов шпинделя:

$$n \geq \max \left(\frac{318 v_{\min}}{D}; n_{\text{ст. min}} \right).$$

Ограничение 5. Наибольшее возможное число оборотов шпинделя:

$$n \leq \min \left(\frac{318 v_{\max}}{D}; n_{\text{ст. max}} \right).$$

Ограничение 6. Наибольшее сечение стружки, допускаемое прочностью и жесткостью изделия, станка и инструмента, а также требованиями к чистоте обработки:

$$s^{y_s} t^{x_s} \leq \min (\alpha \neq 0; \beta \neq 0; \gamma \neq 0; \delta \neq 0; \varepsilon \neq 0; \zeta \neq 0; \psi \neq 0; \nu \neq 0;$$

или

$$s^{y_s} t^{x_s} \leq \Phi,$$

где

$$\alpha = K_s \frac{f_p E_{\text{дер.ж}}}{4 C_z K_z H_B^{n_z}} \cdot \frac{b l^3}{l_p^3};$$

$$\beta = K_{\text{ж}} \frac{f_{\text{заг}} E_{\text{заг}}}{C_z K_z H_B^{n_z}} \cdot \frac{D_{\text{заг}}^4}{L_{\text{заг}}^3};$$

$$\gamma = \frac{C_{II} (4H_{CK})^{n_H} r_{II}^{u_{II}}}{(\varphi \varphi_1)^{z_H}},$$

$$\delta = K_{23} C_s D^p;$$

$$\varepsilon = K_{25} \frac{C_\Phi D^{z_\Phi}}{B^{r_\Phi}};$$

$$\xi = \frac{K_{26} C_r (4H_{CK})^{n_r} D^{z_r}}{z};$$

$$\eta = \frac{P_{\text{под. ст}}}{C_x K_x D^{z_x} H_B^{u_x} z^{u_x} B^{r_x}}.$$

Ограничение 7. Наименьшая подача по кинематике станка:

$$S \geq S_{\text{ст. min.}}$$

Ограничение 8. Наибольшая подача по кинематике стайка:

$$S \leq S_{\text{ст. max.}}$$

Ограничение 9. Наименьшая допустимая глубина резания:

$$t \geq t_{\text{min.}}$$

Ограничение 10. Величина припуска на обработку:

$$t \leq a.$$

Уравнение оценочной функции (критерия оптимальности) имеет следующий вид:

$$f = \frac{C}{nst}.$$

Для приведения полученных нами уравнений и неравенств технических ограничений и критерия оптимальности к линейным формам необходимо их логарифмировать, но до логарифмирования произведем в этих уравнениях и неравенствах некоторые преобразования.

Входящие в уравнения и неравенства величины s , t и a в ряде случаев имеют значения порядка $0,01 \div 0,1$ мм, и им будут соответствовать отрицательные логарифмы.

Для того чтобы исключить возможность появления отрицательных логарифмов, умножим во всех уравнениях и

неравенствах технических ограничений и критерия оптимальности величины s , t , s_z и a на 100 и произведем соответствующие преобразования.

В результате получим:

Для ограничения 1:

$$n(100s)^{y_v}(100t)^{x_v} = \frac{100^{x_v + y_v} \cdot 318 C_v K_v}{T_{\text{ЭК}}^m D^{1-z_v} \left(\frac{H_B}{K_{H_B}} \right)^{n_v} z_v^{u_v} B^{r_v}}.$$

Для ограничения 2:

$$n(100s)^{y_z}(100t)^{x_z} \leq \frac{100^{x_z + y_z} \cdot 975 \cdot 10^3 K_{C_z} N_H \tau_i}{C_z K_z D^{z_z} H_B^{n_z} z^{u_z} B^{r_z}}.$$

Для ограничения 3:

$$n(100s)(100t) \geq \frac{100}{K_\Phi} \cdot \frac{L_{p,x}(100a)}{\left(\frac{60 K_{\text{запр}} r_R}{R} - t_B \right)}. \quad (87)$$

Для ограничения 4:

$$n \geq \max \left(\frac{318 v_{\min}}{D}; n_{\text{ст. min}} \right).$$

Для ограничения 5:

$$n \leq \min \left(\frac{318 v_{\max}}{D}; n_{\text{ст. max}} \right).$$

Для ограничения 6:

$$(100s)^{y_s}(100t)^{x_s} \leq 100^{x_s + y_s} \Phi.$$

Показатели степени x_s и y_s соответствуют одной из пар показателей x_z , y_z , или x_H , y_H , или x_Φ , y_Φ , или x_r , y_r , или x_x , y_x , в зависимости от того, какая из величин α , β , ..., ν дает минимальное значение правой части неравенства (85), и определяются при помощи таблицы 2.

Таблица 2

Значение показателей степени x_s и y_s

Величина, имеющая наименьшее значение	Значение показателей	
	x_s	y_s
α	x_z	y_z
β	x_z	y_z
γ	x_{II}	1,0
ε	x_{Φ}	1,0
ξ	x_r	1,0
ν	x_x	y_x
δ	0	1
ψ	0	1

Для ограничения 7:

$$(100s) \geq (100s_{ст. min}). \quad (88)$$

Для ограничения 8:

$$(100s) \leq (100s_{ст. max}). \quad (89)$$

Для ограничения 9:

$$(100t) \geq (100t_{min}). \quad (90)$$

Для ограничения 10:

$$(100t) \leq (100a). \quad (91)$$

Для уравнения оценочной функции:

$$\bar{f} = \frac{10^4 C}{n(100s)(100t)} = \frac{C_0}{n(100s)(100t)}. \quad (92)$$

Логарифмируем правые и левые части полученных уравнений и неравенств, причем для удобства последующих операций на цифровых автоматических машинах

будем пользоваться натуральными, а не десятичными логарифмами.

В результате получаем:

Для ограничения 1:

$$\ln n + y_v \ln(100s) + x_v \ln(100t) =$$

$$= \ln \left(\frac{100^{x_v + y_v} \cdot 318 C_v K_v}{T_{\text{эк}}^m D^{1-z_v} \left(\frac{H_B}{K_{H_B}} \right)^{n_v} z^{u_v} B^{r_v}} \right). \quad (93)$$

Для ограничения 2:

$$\ln n + y_z \ln(100s) + x_z \ln(100t) \leq$$

$$\leq \ln \left(\frac{100^{x_z + y_z} 975 \cdot 10^3 K_{C_z} N_H \eta}{C_z K_z D^{z_z} H_B^{n_z} z^{u_z} B^{r_z}} \right). \quad (94)$$

Для ограничения 3:

$$\ln n + \ln(100s) + \ln(100t) \geq$$

$$\geq \ln \left[\frac{100}{K_\Phi} \cdot \frac{L_{p \cdot x} \cdot 100 a}{\left(\frac{60 K_{\text{загр}} r_R}{R} - t_b \right)} \right]. \quad (95)$$

Для ограничения 4:

$$\ln n \geq \ln \left[\max \left(\frac{318 v_{\min}}{D}; n_{\text{ст. min}} \right) \right]. \quad (96)$$

Для ограничения 5:

$$\ln n \leq \ln \left[\min \left(\frac{318 v_{\max}}{D}; n_{\text{ст. max}} \right) \right]. \quad (97)$$

Для ограничения 6:

$$y_s \ln(100s) + x_s \ln(100t) \leq \ln(100^{x_s + y_s} \Phi). \quad (98)$$

Для ограничения 7:

$$\ln(100s) \geq \ln(100s_{\text{ст. min}}). \quad (99)$$

Для ограничения 8:

$$\ln(100s) \leq \ln(100s_{\text{ст. max}}). \quad (100)$$

Для ограничения 9:

$$\ln(100t) \geq \ln(100t_{min}). \quad (101)$$

Для ограничения 10:

$$\ln(100t) \leq \ln(100a). \quad (102)$$

Для оценочной функции:

$$\ln f = \ln C_0 - \ln n - \ln(100s) - \ln(100t). \quad (103)$$

Введем следующие обозначения:

$$\ln n = x_1; \quad (104)$$

$$\ln(100s) \text{ или } \ln(100s_2) = x_2; \quad (105)$$

$$\ln(100t) = x_3; \quad (106)$$

$$\ln f = f_0; \quad (107)$$

$$\ln C_0 = C_0; \quad (108)$$

$$\ln \left(\frac{100^{x_v} \cdot y_v \cdot 318 C_v K_v}{T_{\text{ЭК}}^m D^{1-z_v} \left(\frac{H_B}{K_{HB}} \right)^{n_v} z_v^{u_v} B^{r_v}} \right) = b_1; \quad (109)$$

$$\ln \left(\frac{100^{x_z} \cdot y_z \cdot 975 \cdot 10^3 K_{C_z} N_{II} \tau_i}{C_z K_z D^{z_z} H_B^{n_z} z_z^{u_z} B^{r_z}} \right) = b_2; \quad (110)$$

$$\ln \left[\frac{100}{K_\Phi} \cdot \frac{L_{p-x}(100a)}{\left(\frac{60 K_{\text{загр}} r_R}{R} - t_B \right)} \right] = b_3; \quad (111)$$

$$\ln \left[\max \left(\frac{318 v_{min}}{D}; n_{\text{ст. min}} \right) \right] = b_4; \quad (112)$$

$$\ln \left[\min \left(\frac{318 v_{max}}{D}; n_{\text{ст. max}} \right) \right] = b_5; \quad (113)$$

$$\ln(100^{x_s} \cdot y_s \cdot \Phi) = b_6; \quad (114)$$

$$\ln(100 s_{\text{ст. min}}) = b_7; \quad (115)$$

$$\ln(100 s_{\text{ст. max}}) = b_8; \quad (116)$$

$$\ln(100 t_{min}) = b_9; \quad (117)$$

$$\ln(100 a) = b_{10}. \quad (118)$$

Подставляя введенные обозначения в полученные ранее уравнения и неравенства технических ограничений и критерия оптимальности, получим смешанную систему (А) линейных уравнений и неравенств и линейную функцию, подлежащую оптимизации:

$$(A) \left\{ \begin{array}{ll} x_1 + y_0 x_2 + x_3 x_3 = b_1; & (119) \\ x_1 + y_2 x_2 + x_3 x_3 \leq b_2; & (120) \\ x_1 + x_2 + x_3 \geq b_3; & (121) \\ x_1 & \geq b_4; & (122) \\ x_1 & \leq b_5; & (123) \\ & y_5 x_2 + x_3 x_3 \leq b_6; & (124) \\ & x_2 & \geq b_7; & (125) \\ & x_2 & \leq b_8; & (126) \\ & x_3 & \geq b_9; & (127) \\ & x_3 & \leq b_{10}. & (128) \end{array} \right.$$

$$f_0 = C_0 - x_1 - x_2 - x_3. \quad (129)$$

Смешанную систему (А) линейных уравнений и неравенств и линейную функцию f_0 в их совокупности назовем *математической моделью оптимального режима резания для одноинструментной обработки на универсальном станке* и обозначим ее символом W .

Вид математической модели оптимального режима резания и метод ее решения на цифровой автоматической машине остается одним и тем же — единым для всех рассмотренных выше случаев обработки металлов резанием, независимо от вида инструмента, обрабатываемого материала, размеров обработки, типа применяемого для обработки станка и т. п.

Полученная нами математическая модель W представляет собой универсальную теоретическую математическую модель оптимального режима резания при обработке в один и несколько проходов на универсальном металлорежущем станке.

Специфика различных случаев обработки учитывается изменением величин свободных членов $b_1, b_2, \dots, b_{10}$, которые постоянны в условиях каждой задачи, и изменением коэффициентов $x_0, y_0, x_2, y_2, x_3, y_3$.

Таким образом, определение оптимальных режимов резания для каждого из различных или различно работающих инструментов большой группы в несколько десятков или сотен инструментов, работающих на различных станках с учетом влияния фактора многоинструментности, сводится к последовательному решению по единой программе на цифровых автоматических вычислительных машинах однотипных операторов W , что может быть произведено с большой скоростью.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РЕЗАНИЯ ПРИ ОДНОИНСТРУМЕНТНОЙ ОБРАБОТКЕ В НЕСКОЛЬКО ПРОХОДОВ НА УНИВЕРСАЛЬНОМ СТАНКЕ

В различных областях деятельности человека очень часто встречаются задачи выбора наилучшего или оптимального решения из ряда возможных решений.

Совокупность методов и технических средств для исследования и решения задач такого рода развилась в настоящее время в обширную отрасль математики, получившую название *операционных исследований*.

В операционных исследованиях широко используются методы *моделирования и аналогов*, позволяющие заменять сложное и дорогое экспериментирование над реальными объектами и изучаемыми явлениями экспериментированием над их математическими или физическими моделями.

Математическая модель представляет изучаемое явление в абстрактном упрощенном виде, обычно в виде функции от одной или многих переменных или в виде системы уравнений и неравенств различных типов, характеризующих изучаемое явление и взаимосвязи различных факторов, связанных с ним.

Математическая модель может быть представлена как *в аналитическом*, так и *в графическом* виде, что во многих случаях облегчает экспериментирование с ней, причем многие функциональные зависимости в природе и технике проще и удобнее выражаются графически, чем аналитически.

Физическая модель имитирует изучаемое явление с помощью какого-либо аналогового устройства — механического, электрического, гидравлического и т. п. Хотя физическая модель внешне может коренным образом отли-

чатся от изучаемого явления или объекта, тем не менее, изменяя значения отдельных параметров физической модели и наблюдая за последствиями этих изменений, можно получить исчерпывающие данные об изучаемом явлении или объекте, такие же, как если бы проводился действительный эксперимент.

То же самое имеет место и при моделировании на математической модели, когда, изменяя параметры изучаемого явления с помощью математических зависимостей, составляющих модель, можно проследить результаты этих изменений.

Однако, широко применяя математические и физические модели для изучения различных явлений, необходимо всегда помнить об *ограниченности познавательных возможностей* этих моделей. Моделируя то или иное явление, мы никогда не выражаем всех факторов и не выявляем *всех* зависимостей, присущих этому явлению. Поэтому модель никогда не является точной копией действительности.

В ходе исследований методом моделирования выбираются лишь *типичные факторы* и определяются *основные зависимости*, что и составляет сущность метода моделирования.

Современные математические машины создают огромные возможности для развития различных отраслей науки и техники, для автоматизации ряда производственных процессов, в том числе и процессов умственной деятельности человека, таких, как инженерные расчеты при проектировании и т. п.

Однако без строгих формулировок задач, без формального математического описания процессов не может быть достигнут необходимый уровень использования математических машин.

Процесс формализации задачи, являющийся необходимым этапом для перевода каждой технической и прикладной задачи на язык современных математических машин, при решении задач такого рода является наиболее сложным и в высшей степени творческим процессом.

На основе обобщения основных функциональных зависимостей, определяющих различные процессы резания на металлорежущих станках, и формализации этих процессов была получена математическая модель оптимального режима резания при обработке в несколько проходов на универсальных станках.

Выше указывалось, что эта математическая модель, обозначенная нами символом W , является универсальной, пригодной для любого случая обработки резанием, но в то же время она *неисчерпывающая*, так как в ней не отражено влияние на процесс резания многих сопутствующих ему факторов, таких, как вибрации, нагрев изделия, износ и затупление инструментов, и других.

Математическая модель оптимального режима резания может и должна быть усовершенствована в дальнейшем по мере накопления наукой о резании металлов достаточного количества достоверных сведений о самом процессе резания, о поведении станков и инструментов в различных условиях обработки, об экономике и рациональной организации обработки металлов резанием.

Полученная нами математическая модель оптимального режима резания при обработке в несколько проходов на универсальных станках представляет *смешанную* (т. е. состоящую из уравнений и неравенств) систему (A) с тремя неизвестными и линейную функцию f_0 , подлежащую минимизации:

$$W - (A) \left\{ \begin{array}{l} x_1 + y_1 x_2 + x_3 x_3 = b_1; \\ x_1 + y_2 x_2 + x_3 x_3 \leq b_2; \\ x_1 + x_2 + x_3 \geq b_3; \\ x_1 \geq b_4; \\ x_1 \leq b_5; \\ y_5 x_2 + x_3 x_3 \leq b_6; \\ x_2 \geq b_7; \\ x_2 \leq b_8; \\ x_3 \geq b_9; \\ x_3 \leq b_{10}; \end{array} \right.$$

$$f_0 = C_0 - x_1 - x_2 - x_3 \rightarrow \min.$$

Значения неизвестных x_1, x_2, x_3 и свободных членов $b_1, b_2, \dots, b_{16}$ были подробно разъяснены выше.

Исследование и определение оптимального режима резания на металлорежущих станках с помощью математической модели оказывается значительно проще и удобнее, чем с помощью физической модели. Объясняется это тем,

что в настоящее время еще недостаточно хорошо изучены различные сложные физические явления при образовании металлической стружки и при износе режущих инструментов; кроме того, оптимальный режим резания зависит не только от самого процесса резания как физического явления, но и от организации и экономики производства, от кинематики и динамики станка, на котором производится обработка, от прочности и жесткости обрабатываемой детали и от ряда других сопутствующих процессу резания факторов. Поэтому построить в настоящее время полноценную физическую модель оптимального режима резания практически невозможно.

Что же касается математической модели оптимального режима резания, то она строится на основе большого числа эмпирических зависимостей, полученных в результате статистической обработки достаточного количества опытных данных о различных процессах обработки резанием, разнообразных экономических и производственных показателей машиностроительных заводов.

Поэтому математическая модель достаточно правильно и точно отражает взаимосвязи различных физических, технических и экономических факторов, влияющих на оптимальность процесса резания.

Другими словами, *математическая модель оптимального режима резания дает достаточно точное представление о конечных результатах взаимного влияния друг на друга факторов, участвующих в процессе резания, без детального изучения сущности физических и экономических явлений, определяющих этот процесс.*

Тем не менее математическое моделирование оптимального процесса резания позволяет успешно решать многие вопросы, связанные с проектированием технологических процессов, металлорежущих станков, автоматических линий и производств.

Задачей настоящей работы является изыскание методов определения оптимальных режимов резания, в связи с чем уточним само понятие — *оптимальный режим резания*.

Критерием оценки режима резания может быть доведение какого-либо показателя этого процесса до максимума или до минимума: до максимума надо доводить производительность, до минимума — себестоимость технологической операции, расход инструментов, потребление энергии и т. п.

Критерий оптимальности реализуется в принимаемом

режиме резания как достижение заданной производительности различными средствами с минимальными издержками и гораздо реже как достижение максимальной производительности, не считаясь с издержками.

Условимся под оптимальным режимом резания понимать режим резания, обеспечивающий с минимальными затратами заданную производительность при работе в рамках заданных технических ограничений.

Если обратиться к математической модели оптимального режима резания, то замечаем, что входящая в нее смешанная система (A) и характеризует как раз основные технические ограничения, в рамках которых протекает процесс резания. В том числе неравенство (121) характеризует заданную производительность, линейная же форма (129) характеризует часть себестоимости операции, зависящую от режима резания.

Таким образом, задача определения оптимального режима резания математически сводится к тому, чтобы среди всевозможных неотрицательных решений x_1, x_2, x_3 системы (A) найти такие значения $x_{1\text{опт}}, x_{2\text{опт}}, x_{3\text{опт}}$, при которых линейная форма f_0 принимает наименьшее возможное значение.

Как уже указывалось выше, задачи подобного рода успешно решаются методами линейного программирования, являющегося также одним из методов операционных исследований.

Линейное программирование в применении к данной задаче представляет метод отыскания такой комбинации взаимозависимых элементов режима резания — числа оборотов, подачи и глубины резания, — которая из ряда возможных комбинаций является наилучшей.

В процессе линейного программирования из совокупности возможных решений задачи на основе определенных критериев, в данном случае заданных технических ограничений, выбираются допустимые решения, из которых в свою очередь также на основе определенного критерия — достижения минимума себестоимости — выбирается оптимальное решение. Последнее достигается путем сопоставления допустимых решений с так называемой целевой, или оценочной, функцией, которой в рассматриваемом случае является линейная форма (129).

При последующем исследовании математической модели с целью нахождения оптимального режима резания мы

будем всегда придерживаться этой последовательности действий.

При определении оптимальных режимов резания могут встретиться случаи, когда для этого недостаточно одного критерия оптимальности. Оптимальное решение, определяемое одним критерием, будет неоднозначным, т. е. будут существовать многие допустимые комбинации элементов режима резания, при которых себестоимость операции одинаковая и минимальная.

В этом случае для нахождения оптимального решения необходимо применять дальнейшие, более тонкие критерии, в соответствии с которыми производится окончательный, более узкий выбор. Такими дополнительными критериями могут быть сложность модернизации оборудования или замены приспособления другим, более удобным для данного конкретного случая, невозможность осуществления того или иного технического мероприятия и т. п.

В ряде случаев нахождение оптимального режима резания будет невозможным без изменения одного или нескольких технических ограничений, или, что то же самое, исходных данных для расчета; при этом может также встретиться несколько вариантов.

При выборе наилучшего варианта в этом случае необходимо руководствоваться примерно такими же дополнительными критериями, что и в предыдущем случае.

Выбор и оценка дополнительных критериев при определении оптимальных режимов резания производится обычно лицом, проектирующим процесс, и требует большого опыта. Учитывая необходимость автоматизации процессов моделирования и расчета оптимальных режимов резания, мы в дальнейшем изложении в некоторой степени формализуем этот процесс.

Появление автоматических электронных цифровых и моделирующих машин сделало возможным быстрый и достоверный анализ многочисленных возможных комбинаций и альтернатив и открыло широкие возможности для применения методов линейного программирования при решении вариационных задач, в том числе и при определении оптимальных режимов резания, в особенности для многоинструментных агрегатных станков и автоматических линий, где число параллельно работающих инструментов достигает нескольких сотен.

Возвратимся к математической модели оптимального режима резания.

Системе (А) линейных уравнений и неравенств в линейной форме f_0 в трехмерном пространстве соответствует ряд плоскостей, расположенных как параллельно координатным плоскостям, так и под различными углами к ним.

Пересекаясь между собой, эти плоскости образуют выпуклый многогранник, одна из вершин которого, как это доказывается в теории линейного программирования, соответствует оптимальному решению — координаты этой вершины равны $x_{1\text{опт}}$, $x_{2\text{опт}}$ и $x_{3\text{опт}}$.

Для определения оптимального решения достаточно выбрать ту вершину многогранника, в которой линейная форма f_0 достигает минимума.

Задача при этом решается по методике, изложенной ниже.

В данном случае решение задачи может быть значительно упрощено за счет приведения системы (А) с тремя неизвестными к системе (А') с двумя неизвестными.

В результате такого преобразования значительно упростится математическая модель и решение задачи как аналитическое, так и графическое, которое теперь уже будет производиться в двухмерном пространстве — на плоскости.

Определим из уравнения (119) системы (А) неизвестное x_1 и подставим его значение во все неравенства этой системы, в которые оно входит:

$$x_1 = b_1 - y_v x_2 - x_v x_3. \quad (130)$$

В результате получаем новую систему (А'), содержащую уже только два неизвестных x_2 и x_3 :

$$(y_z - y_v) x_2 + (x_z - x_v) x_3 \leq b_2 - b_1; \quad (131)$$

$$(1 - y_v) x_2 + (1 - x_v) x_3 \geq b_3 - b_1; \quad (132)$$

$$y_v x_2 + x_v x_3 \leq b_1 - b_4; \quad (133)$$

$$y_v x_2 + x_v x_3 \geq b_1 - b_5; \quad (134)$$

$$y_v x_2 + x_v x_3 \leq b_6; \quad (124)$$

$$x_2 \geq b_7; \quad (125)$$

$$x_2 \leq b_8; \quad (126)$$

$$x_3 \geq b_9; \quad (127)$$

$$x_3 \leq b_{10}. \quad (128)$$

Подставляя значение x_1 в линейную форму (129), получаем:

$$f_0 = C_0 - [(1 - y_v) x_2 + (1 - x_v) x_3]. \quad (135)$$

Так как величина C_0 в условиях конкретной задачи постоянна, то очевидно, что линейная форма (135) достигнет минимума в том случае, когда линейная форма

$$f'_0 = (1 - y_v) x_2 + (1 - x_v) x_3 \quad (136)$$

достигнет максимума.

На рис. 1 изображены прямые неравенств системы (A') и выделена область возможных решений этой системы, соответствующая смыслу ее неравенств.

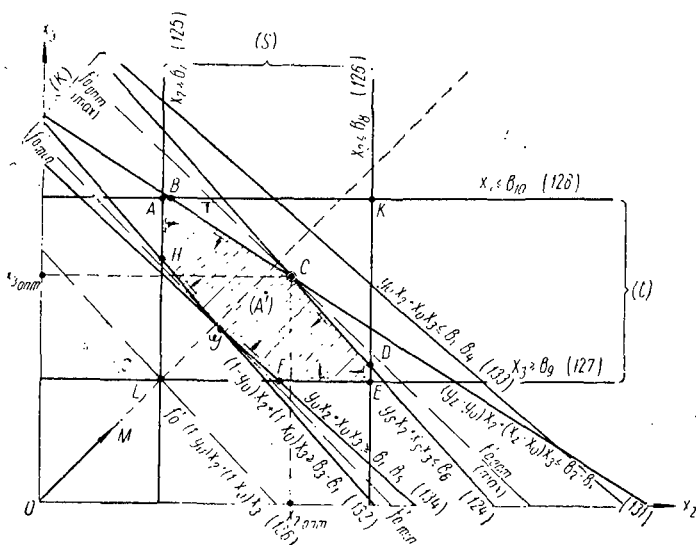


Рис. 1. График математической модели оптимального режима резания при обработке в несколько проходов на универсальном станке:

- ABCDEFGH — многоугольник возможных решений системы (A');
- (K) — область возможных решений по скоростям резания, определяемым кинематикой станка и инструмента;
- (S) — область возможных решений по подачам, имеющимся на станке;
- (I) — область возможных решений по глубинам резания;
- AKEL — область возможных решений по сечениям стружки;
- C — точка оптимума.

Пусть на рис. 1 это будет многоугольник $ABCDEFGH$. Обозначим область возможных решений тем же символом (A'), что и соответствующую ей систему линейных неравенств.

Прямая каждого из неравенств, составляющих систему (A'), делит плоскость на две части, каждая из которых называется *полуплоскостью*. Эта прямая называется *граничной прямой*. По одну сторону ее расположена полуплоскость, каждая точка которой удовлетворяет неравенству этой прямой, по другую сторону — полуплоскость, точки которой не удовлетворяют неравенству граничной прямой. Точки, лежащие на самой граничной прямой, удовлетворяют уравнению, получающемуся, если знак неравенства заменить знаком равенства.

На рис. 1 и на последующих направление полуплоскости возможных решений указано стрелкой около граничной прямой.

Граничные прямые, пересекаясь между собой, образуют многоугольник, причем часть плоскости, ограниченная этим многоугольником, лежит по одну сторону от каждой граничной прямой, участвующей в образовании этого многоугольника.

Точки плоскости, расположенные внутри этого многоугольника, удовлетворяют неравенствам всех граничных прямых, участвующих в его образовании.

Будем называть этот многоугольник *многоугольником возможных решений* системы неравенств.

Примем без доказательств, что многоугольник возможных решений всегда является выпуклым.

Выпуклым многоугольником называется такой многоугольник, который вместе с любыми двумя своими точками содержит и весь соединяющий их отрезок.

Заметим, что общая часть нескольких выпуклых многоугольников есть также выпуклый многоугольник.

Для выпуклого многоугольника можно построить множество таких прямых, что каждая из них имеет, по крайней мере, одну общую точку с многоугольником и весь многоугольник находится по одну сторону от такой прямой.

Прямые, отвечающие этим требованиям, называются *опорными прямыми*.

Так, на рис. 1 прямые функций $f'_{o.max}$ и $f'_{o.min}$ являются опорными.

Опорная прямая может иметь с выпуклым многоугольником общую часть, состоящую или из одной точки, или из отрезка. В последнем случае опорная прямая параллельна одной из сторон многоугольника.

Неравенствам системы (A') соответствует множество точек плоскости, образующее многоугольник решений $ABCDEFGH$ (рис. 1).

Всякая пара чисел (x_2, x_3) , удовлетворяющая всем неравенствам (A'), называется решением данной системы неравенств. Иными словами, всякая точка плоскости (x_2, x_3) , координаты которой удовлетворяют системе (A'), является решением этой системы.

Этому требованию удовлетворяют все точки, ограниченные многоугольником решений $ABCDEFGH$.

Заметим, что могут быть случаи, когда одна или несколько граничных прямых не образуют многоугольника решений и не имеют с ним общих точек, но тем не менее точки, ограниченные многоугольником решений, удовлетворяют и этим граничным прямым. Это может быть, если многоугольник решений расположен в полуплоскости возможных решений граничной прямой.

На рис. 1 такому случаю соответствует прямая неравенства (133).

Система неравенств может не иметь ни одного решения (рис. 2). Геометрически это означает, что не существует ни одной точки, координаты которой удовлетворяют всем неравенствам системы.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Система неравенств с двумя переменными может быть совместна или несовместна.

2. Система неравенств с двумя переменными совместна, если существует, по крайней мере, одна точка плоскости, принадлежащая всем полуплоскостям, определяемым данной системой неравенств. Множество таких точек может быть полуплоскостью, ограниченным или неограниченным многоугольником, прямой или ее отрезком и, наконец, одной точкой.

3. Система неравенств несовместна, если не существует ни одной точки плоскости, удовлетворяющей одновременно всем неравенствам системы.

Для того чтобы определить многоугольник решений, нужно найти координаты его вершин, что достигается сле-

дующим образом. Решая попарно уравнения граничных прямых системы, находим все возможные точки пересечения этих прямых, что соответствует определению координат точек пересечения. Из всех возможных точек пересечения граничных прямых выделяем точки, являющиеся вершинами многоугольника решений. Для этого подставляем координаты всех возможных точек пересечения граничных прямых в неравенства рассматриваемой системы. Точки, координаты которых удовлетворяют *всем без исключения* неравенствам рассматриваемой системы, являются вершинами многоугольника решений.

На рис. 1 для системы неравенств (A') такими точками являются точки A, B, C, D, E, F, G, H .

Внутри многоугольника решений $ABCDEFGH$ лежат все точки, удовлетворяющие системе (A').

Заметим, что в результате выполнения перечисленных выше действий автоматически отпали граничные прямые, не образующие многоугольника решений.

Так, на рис. 1 ни одна из точек пересечения граничной прямой (133) с другими прямыми не образовала вершины многоугольника решений.

Неравенства, которые можно удалить из системы, не изменяя множества ее решений, называются *зависимыми*, или «*лишними*».

Удаление «лишних» неравенств является очень сложным и трудоемким процессом, при решении же задачи методами линейного программирования оно происходит автоматически.

Предположим, что рассматриваемая система линейных неравенств совместна и граничные прямые этих неравенств образуют многоугольник решений. Пусть, кроме того, задана линейная функция двух переменных; для рассматриваемого нами случая это будет линейная форма

$$f_0 = (1 - y_v) x_2 + (1 - x_v) x_3.$$

Как указывалось выше, для нахождения оптимального решения среди многих возможных решений системы (A') необходимо среди множества точек (x_2, x_3) многоугольника решений найти такие, которые придают линейной форме (136) наибольшее значение.

На рис. 1 прямая линейной формы (136) изображена штрих-пунктиром. Эта прямая нормальна к вектору M , выходящему из начала координат.

Будем перемещать прямую (136) параллельно самой себе в положительном направлении вектора M , т. е. от начала координат. Пусть при движении прямой (136) она впервые встретится с многоугольником решений в вершине G . В этом положении прямая (136) становится опорной. При дальнейшем движении в том же направлении она пройдет через многоугольник решений и достигнет его вершины C , где снова станет опорной прямой.

Так как направление вектора M есть направление возрастания линейной формы, то на опорной прямой, проходящей через вершину G , линейная форма принимает наименьшее значение, а на опорной прямой, проходящей через вершину C , — наибольшее среди ее значений, принимаемых на многоугольнике решений.

Следовательно, на рис. 1 вершина C многоугольника решений является точкой оптимума, а ее координаты $x_{2\text{опт}}$ и $x_{3\text{опт}}$ — оптимальные решения системы (A') .

Пересечение опорной прямой с многоугольником решений может состоять либо из одной точки (вершины многоугольника), либо из бесчисленного множества точек (стороны многоугольника).

В последнем случае для окончательного выбора оптимального решения необходимо, как указывалось выше, привлечение дополнительных, более тонких критериев.

Напомним, что на рис. 1 число и обозначения вершин многоугольника решений, а также выбор вершины C в качестве точки оптимума являются произвольными, принятыми для данного примера. В других случаях они могут быть иными.

Подставляя величины $x_{2\text{опт}}$ и $x_{3\text{опт}}$ в уравнение (130), находим оптимальное значение третьей переменной:

$$x_{1\text{опт}} = b_1 - y_v x_{2\text{опт}} - x_v x_{3\text{опт}}, \quad (137)$$

а затем на основании уравнений (104), (105) и (106) определяем оптимальные значения элементов режима резания:

числа оборотов шпинделя или инструмента

$$n_{\text{опт}} = e^{x_{1\text{опт}}}, \quad (138)$$

подачи на оборот или на зуб

$$s_{\text{опт}} = \frac{e^{x_{2\text{опт}}}}{100}, \quad (139)$$

глубины резания

$$t_{\text{опт}} = \frac{e^{x_{3\text{опт}}}}{100}. \quad (140)$$

Решение задач определения оптимальных режимов резания по рассмотренной выше схеме не представляло бы особых затруднений, если бы система (A') была всегда совместна. Однако в практике такие случаи встречаются сравнительно редко, гораздо чаще система (A') бывает несовместной (рис. 2).

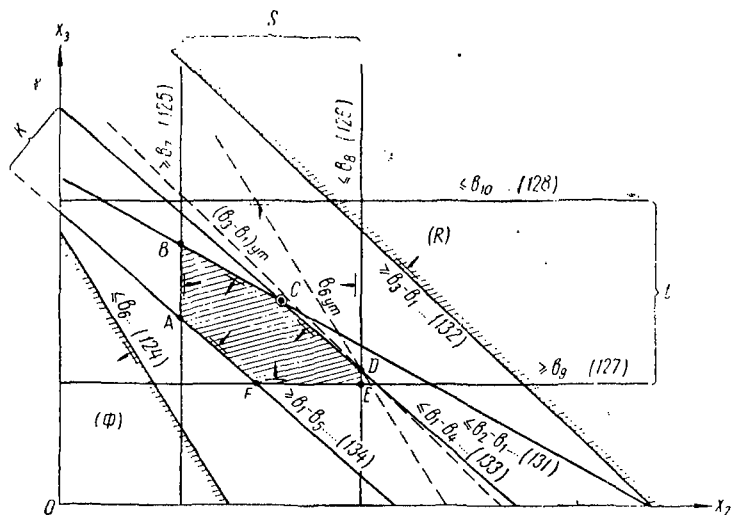


Рис. 2. Случай несовместности системы (A'):

- (R) — область возможных решений по заданной производительности;
 (Φ) — область возможных решений по прочности и жесткости системы станок—изделие—инструмент и по требованиям к чистоте обработки;
 $ABCDEF$ — многоугольник возможных решений по остальным техническим ограничениям.

В технической интерпретации несовместность системы (A') означает, что технические ограничения в виде исходных данных для расчета не согласуются между собой, не учтены реальные возможности станка или инструмента, особенности обрабатываемой детали, их прочность, жесткость, мощность электродвигателя станка, требования к чистоте обработанной поверхности и т. п.

Так, например, расположение граничных прямых неравенств (132) и (124) на рис. 2 указывает на несовместность системы (A'): производительность (прямая 132) задана слишком высокой (такая производительность не может быть достигнута на данном станке без значитель-

ной его модернизации); с другой стороны, технологически допустимая подача (прямая 124) находится значительно ниже возможностей станка, резко ограничивает эффективность технологического процесса и, вообще говоря, не может быть реализована на данном станке.

В подобных случаях, прежде чем приступить к определению оптимального режима резания, следует привести систему (A') к совместному виду. Для этого необходимо откорректировать исходные данные и технические ограничения. Это означает, что должны быть осуществлены те или иные технологические, конструкторские, организационные мероприятия, устраняющие узкие места в проектируемых технологических процессах, станках или оснастке.

Так, например, для случая, изображенного на рис. 2, необходимо уменьшить заданную производительность до величины, допускаемой станком. Это означает, что нужно найти такое значение свободного члена $(b_3 - b_1)$ неравенства (132), при котором его граничная прямая стала бы по крайней мере опорной прямой многоугольника решений в его вершине, ближайшей к этой граничной прямой. Определив уточненное значение свободного члена $(b_3 - b_1)_{\text{ут}}$, находим затем уточненное значение производительности станка — $R_{\text{ут}}$.

После этого в ту же вершину необходимо переместить граничную прямую неравенства (124), для чего уточняется значение его свободного члена b_6 .

Для определения уточненных значений свободных членов достаточно подставить в уравнения соответствующих им граничных прямых на место переменных координаты вершины, избранной для уточнения.

После подстановки уточненных значений свободных членов в неравенства системы (A') последняя становится совместной и можно приступить к определению оптимального режима резания.

Исследование системы (A') линейных неравенств. Неравенства, входящие в систему (A') , могут быть разделены на четыре группы.

1. Неравенства, характеризующие кинематику станка и процесса резания:

$$(K) \begin{cases} y_v x_2 + x_v x_3 \leq b_1 - b_4; \\ y_v x_2 + x_v x_3 \geq b_1 - b_5. \end{cases}$$

Обозначим эту группу неравенств и соответствующую ей область решений символом (K) .

2. Неравенства, характеризующие динамику станка и процесса резания:

$$(D) \begin{cases} (y_z - y_v) x_2 + (x_z - x_v) x_3 \leq b_2 - b_1; \\ y_s x_2 + x_s x_3 \leq b_6. \end{cases}$$

Обозначим эту группу неравенств и соответствующую ей область решений символом (D) .

3. Неравенства, характеризующие возможные сечения срезаемого слоя металла или стружки:

$$(F) \begin{cases} x_2 \geq b_7; \\ x_2 \leq b_8; \\ x_3 \geq b_9; \\ x_3 \leq b_{10}. \end{cases}$$

Обозначим эту группу неравенств и соответствующую ей область решений символом (F) .

4. Неравенство, характеризующее заданную производительность станка:

$$(R) \{ (1 - y_v) x_2 + (1 - x_v) x_3 \geq b_3 - b_1.$$

Обозначим это неравенство и соответствующую ему область решений символом (R) .

Рассмотрим первую группу неравенств (K) .

На графике (рис. 3) граничные прямые неравенств группы (K) всегда параллельны между собой, причем прямая (133) проходит всегда выше прямой (134).

Между граничными прямыми расположена зона (K) возможных решений по кинематике станка и процесса резания, зависящая от диапазона чисел оборотов станка и от режущих возможностей инструмента.

Так как всегда $b_5 > b_4$ и, следовательно, $b_1 - b_5 < b_1 - b_4$, то правая часть неравенства (133) всегда больше правой части неравенства (134) и система (K) всегда совместна, как состоящая из двух неравенств разного смысла, имеющих одинаковые левые части. Поэтому граничная прямая (133) всегда расположена выше граничной прямой (134) и параллельна ей, а так как неравенства (133) и (134) имеют разные знаки, то между граничными прямыми расположена область решений (K) .

Рассмотрим третью группу неравенств (F) .

Система (F) также всегда совместна, так как она состоит из двух пар неравенств: (125), (126) и (127), (128), каждая из которых по тем же причинам, что и для системы (K), совместна и образует область возможных решений в виде полосы, заключенной между двумя параллельными

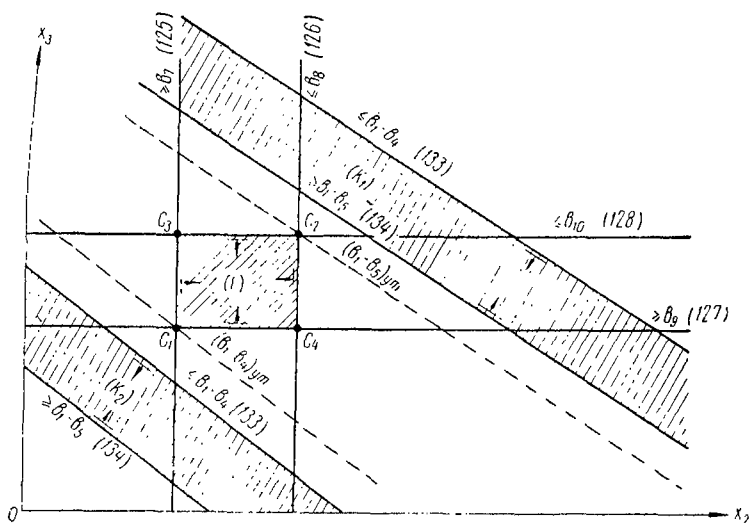


Рис. 3. Случай несовместности групп (K) и (F) системы (A');:

(K₁) и (K₂) — области возможных решений по кинематике станка и процесса резания;
(F) — область возможных решений по сечению стружки.

граничными прямыми (рис. 3). Пересекаясь, эти две полосы образуют область решений системы (F), ограниченную четырехугольником $C_1C_3C_2C_4$.

Заметим, что всегда $b_7 < b_8$ и $b_9 < b_{10}$, что и служит основанием для приведенных выше утверждений.

Любая точка в пределах четырехугольника $C_1C_3C_2C_4$ соответствует определенному сечению стружки, которое может встретиться при решении данной задачи, в частности точка C_1 соответствует минимальному сечению стружки, а точка C_2 — максимальному.

На рис. 4 изображены зависимости между подачей s , глубиной резания t и сечениями стружки для продольного

точения и цилиндрического фрезерования. Наибольшим значениям s и t соответствуют наибольшие сечения стружки, а наименьшим значениям s и t — наименьшие, что полностью согласуется с графиком системы (F) на рис. 4.

Рассмотрим условия совместности двух систем (K) и (F).

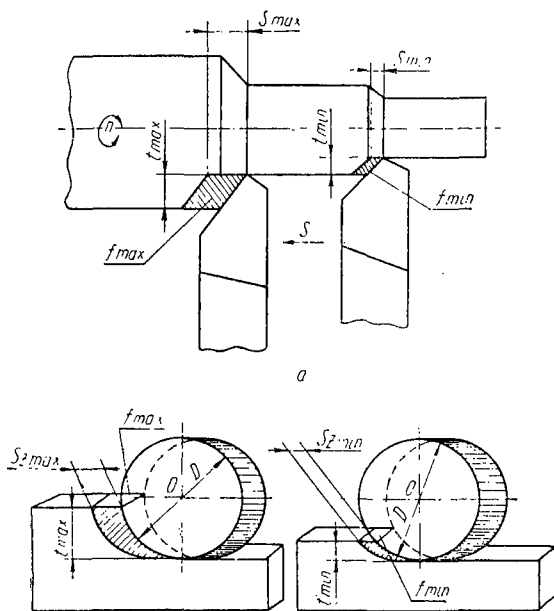


Рис. 4. Зависимость между подачей, глубиной резания и площадью сечения стружки при точении и фрезеровании:

а — продольное точение.

Площадь сечения стружки, срезаемой в 1 мин., равна
 $f = st \text{ мм}^2/\text{мин};$

б — цилиндрическое фрезерование.

Средняя площадь сечения стружки, срезаемой одним зубом фрезы, равна:

$$f_{\text{ср}} = Bs_z \sqrt{\frac{t}{D}} \text{ мм}^2/\text{зуб}.$$

Из рис. 3 очевидно, что если граничная прямая неравенства (133) системы (K) проходит ниже точки C_1 области (F) или граничная прямая (134) системы (K) проходит выше точки C_2 области (F), то системы (K) и (F) будут несовместны.

Следовательно, для совместности систем (K) и (F) необходимо выполнение следующих условий:

$$y_v b_7 + x_v b_9 < b_1 - b_4 \quad (137)$$

и

$$y_v b_8 + x_v b_{10} \geq b_1 - b_5. \quad (138)$$

Если же не выполняется хотя бы одно из неравенств (137) или (138), то системы (K) и (F) будут несовместны.

Несовместность систем (K) и (F) указывает на то, что максимальное или минимальное число оборотов станка, определяемое его кинематикой и режущими возможностями инструмента (кинематикой резания), не согласуется с максимальным или минимальным сечениями стружки, возможными при осуществлении проектируемого технологического процесса в соответствии с исходными данными для расчета.

Для приведения систем (K) и (F) к совместному виду необходимо внести изменения в исходные данные или технические ограничения.

Приведение систем (K) и (F) к совместному виду достигается посредством уточнения свободных членов $(b_1 - b_4)$ или $(b_1 - b_5)$.

Если не выполняется неравенство (137), т. е. если $y_v b_7 + x_v b_9 > b_1 - b_4$, то для приведения систем (K) и (F) к совместному виду достаточно, чтобы граничная прямая (133) системы (K) превратилась хотя бы в опорную прямую многоугольника $C_1 C_3 C_2 C_4$ в его вершине C_1 .

В этом случае

$$b_{1_{\text{нТ}}} = b_4 + (y_v b_7 + x_v b_9) \quad (139)$$

или

$$b_{4_{\text{нТ}}} = b_1 - (y_v b_7 + x_v b_9). \quad (140)$$

Если не выполняется неравенство (138), т. е. если $y_v b_8 + x_v b_{10} < b_1 - b_5$, то для приведения систем (K) и (F) к совместному виду достаточно, чтобы граничная прямая (140) системы (K) превратилась хотя бы в опорную прямую многоугольника $C_1 C_3 C_2 C_4$ в его вершине C_2 .

В этом случае

$$b_{1_{\text{нТ}}} = b_5 + (y_v b_8 + x_v b_{10}) \quad (141)$$

или

$$b_{5_{\text{нТ}}} = b_1 - (y_v b_8 + x_v b_{10}). \quad (142)$$

На основании изложенных выше соображений об уточнении свободных членов приходим к выводу, что в первую очередь необходимо использовать все возможности, которые представляют уточнение свободного члена b_1 , и только в том случае, если их окажется недостаточно, использовать уточнение b_4 или b_5 . При этом совместность систем (K) и (F) будет достигнута с минимальным отклонением от заданных технических ограничений и потребу-

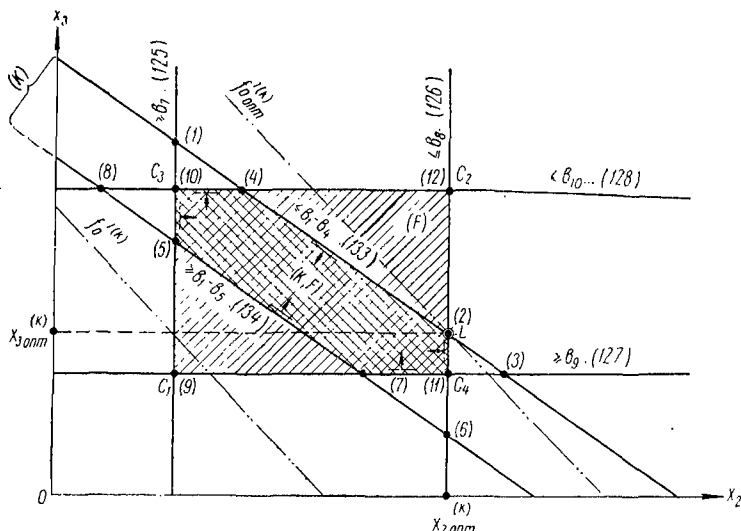


Рис. 5. Определение оптимального решения групп (K) и (F) :

L — точка оптимума групп (K) и (F) ;

$(K; F)$ — область возможных решений групп (K) и (F) .

ет наиболее простых и экономичных технических мероприятий. В этих случаях оптимальному решению систем (K) и (F) будет соответствовать либо точка C_1 , либо точка C_2 .

Как было доказано выше, недопустимо для согласования систем (K) и (F) уменьшать свободный член b_9 или увеличивать свободный член b_{10} и технически сложно, а в связи с этим неприемлемо изменять величины свободных членов b_7 и b_8 , хотя, вообще, это возможно.

Найдем оптимальное решение для систем (K) и (F) в случае их совместности (рис. 5), для чего воспользуемся методикой, изложенной в настоящей главе.

Решая попарно все неравенства, составляющие системы (K) и (F) , находим координаты 12 возможных точек пересечения граничных прямых этих неравенств. Пусть это будут точки 1, 2, . . . , 12. Из 12 возможных точек пересечения граничных прямых выделим точки, являющиеся вершинами многоугольника решений, — это будут точки, координаты которых удовлетворяют всем без исключения неравенствам систем (K) и (F) . Пусть на рис. 5 это будут точки 5, 10, 4, 2, 11, 7.

Из всех вершин многоугольника решений выделим вершину, координаты которой при подстановке их вместо переменных в линейную форму (136) дают наибольшее ее значение, равное $f'_{\text{опт}}^{(K)}$. Пусть на рис. 5 это будет вершина Z . Координаты этой вершины $x_{2\text{опт}}^{(K)}$ и $x_{3\text{опт}}^{(K)}$ представляют оптимальное решение систем (K) и (F) .

Очевидно, что в случае несовместности систем (K) и (F) , после приведения их к совместному виду по изложенной выше методике, точками оптимума могут быть только точки $C_1(b_7, b_9)$ или $C_2(b_8, b_{10})$, а оптимальными решениями систем (K) и (F) могут быть только

$$x_{2\text{опт}}^{(K)} = b_7 \text{ и } x_{3\text{опт}}^{(K)} = b_9$$

или соответственно

$$x_{2\text{опт}}^{(K)} = b_8 \text{ и } x_{3\text{опт}}^{(K)} = b_{10}.$$

Рассмотрим вторую группу неравенств (D) , состоящую из неравенств (131) и (124). Неравенство (131) характеризует взаимосвязь динамики станка с режущими возможностями инструмента, а неравенство (124) — взаимосвязь между прочностью и жесткостью системы станок — приспособление — изделие — инструмент и усилиями, возникающими в процессе резания. При чистовой обработке оно характеризует взаимосвязи между размерами и геометрией инструмента и сечением стружки, с одной стороны, и чистотой обработанной поверхности детали — с другой.

Система (D) всегда совместна (рис. 6), так как неравенства (131) и (124) являются неравенствами одинакового смысла и образуют область решений в одном направлении.

Рассмотрим условия совместности двух систем (D) и (F) . Из рис. 6 очевидно, что для этого достаточно, чтобы координаты, по крайней мере, только одной точки C_1 области (F) удовлетворяли обоим неравенствам системы (D) .

Следовательно, для совместности систем (D) и (F) необходимо выполнение следующих условий:

$$(y_z - y_v) b_7 + (x_z - x_v) b_9 \leq b_2 - b_1 \quad (143)$$

и

$$y_s b_7 + x_s b_9 \leq b_6. \quad (144)$$

Если же не выполняется хотя бы одно из неравенств (143) или (144), то системы (D) и (F) будут несовместны.

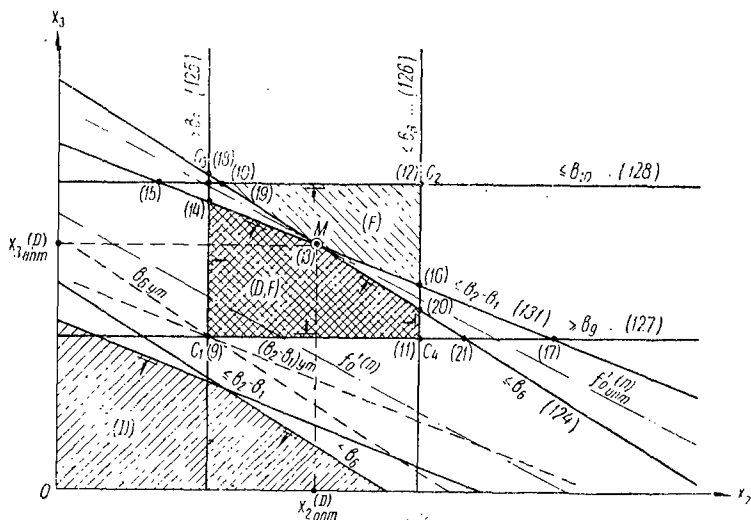


Рис. 6. Случай несовместности и определения оптимального решения групп (D) и (F):

- (D; F) — область возможных решений групп (D) и (F);
- D — область возможных решений группы (D) при несовместности ее с группой (F);
- M — точка оптимума для групп (D) и (F).

Может быть случай (рис. 6), когда не выполняются оба неравенства.

Несовместность систем (D) и (F) указывает на то, что мощность электродвигателя станка и крутящий момент на его шпинделе недостаточны для работы даже с минимальным возможным сечением стружки, или на то, что в системе станок—приспособление—деталь—инструмент имеются недостаточно прочные или жесткие звенья, а при чистовой обработке заданная степень чистоты обработки недостижима при проектируемом процессе.

Если не выполняется неравенство (143), т. е. если

$$(y_z - y_v) b_7 + (x_z - x_v) b_9 > b_2 - b_1,$$

то для приведения систем (D) и (F) к совместному виду достаточно, чтобы граничная прямая (131) системы (D) превратилась бы в опорную прямую многоугольника $C_1 C_3 C_2 C_4$ в его вершине C_1 .

В этом случае

$$b_{1_{\text{ут}}} = b_2 - [(y_z - y_v) b_7 + (x_z - x_v) b_9] \quad (145)$$

или

$$b_{2_{\text{ут}}} = b_1 + [(y_z - y_v) b_7 + (x_z - x_v) b_9]. \quad (146)$$

Если же не выполняется неравенство (144), т. е. если

$$y_s b_7 + x_s b_9 > b_6,$$

то для приведения систем (D) и (F) к совместному виду достаточно, чтобы граничная прямая (124) превратилась в опорную прямую многоугольника $C_1 C_3 C_2 C_4$ в его вершине C_1 .

В этом случае

$$b_{6_{\text{ут}}} = y_s b_7 + x_s b_9. \quad (147)$$

Если одновременно не выполняются оба неравенства (143) и (144), то для приведения систем (D) и (F) к совместному виду достаточно превратить в опорные прямые многоугольника $C_1 C_3 C_2 C_4$ в его вершине C_1 обе граничные прямые (131) и (124). В этом случае необходимо уточнить все три свободных члена, определить значения $b_{1_{\text{ут}}}$, $b_{2_{\text{ут}}}$, $b_{6_{\text{ут}}}$ и из них выбрать сначала $b_{1_{\text{ут}}}$ и $b_{6_{\text{ут}}}$, а затем в случае их недостаточности $b_{2_{\text{ут}}}$ и $b_{6_{\text{ут}}}$.

Во всех трех случаях несовместности систем (D) и (F) оптимальному решению, после приведения их к совместному виду, будет соответствовать точка C_1 и

$$x_{2_{\text{опт}}}^{(D)} = b_7, \text{ а } x_{3_{\text{опт}}}^{(D)} = b_9.$$

По рассмотренным выше соображениям мы и в данном случае избегаем уточнения свободных членов b_7 и b_9 , хотя это и возможно технически.

Найдем оптимальное решение систем (D) и (F) в случае их совместности (рис. 6), для чего воспользуемся той же методикой, что и в предыдущем случае при рассмотрении систем (K) и (F) .

Решая попарно все неравенства, составляющие системы (D) и (F), находим координаты 13 возможных точек пересечения граничных прямых этих неравенств. Пусть на рис. 6 это будут точки 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21.

Из 13 возможных точек пересечения граничных прямых выделим точки, являющиеся вершинами многоугольника решений, — это будут точки, координаты которых удовлетворяют всем без исключения неравенствам систем (D) и (F). Пусть на рис. 6 это будут точки 9, 14, 13, 20, 11.

Из всех вершин многоугольника решений выделим вершину, координаты которой при подстановке их вместо переменных в линейную форму (136) дают наибольшее ее значение, равное $f_{\text{опт}}^{(D)}$. Пусть на рис. 6 это будет вершина M. Координаты этой вершины $x_{\text{опт}}^{(D)}$ и $x_{\text{опт}}^{(D)}$ представляют оптимальное решение систем (D) и (F).

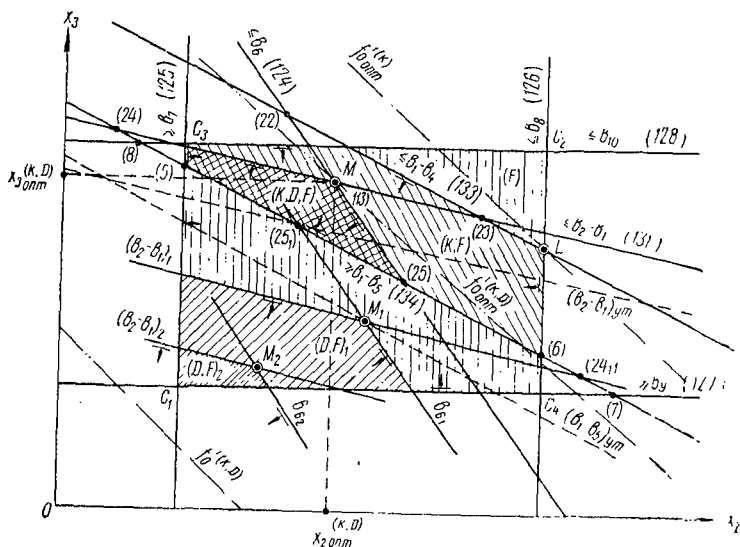


Рис. 7 Случай несовместности групп (K), (D), (F) системы (A'): (K; D; F) — область возможных решений системы (A'); (F) — область возможных решений по сечению стружки; (K; F) — область возможных решений по кинематике станка, процессу резания и сечению стружки; (D; F)₁ и (D; F)₂ — области возможных решений по динамике станка и сечению стружки; M₁ и M₂ — точки оптимума для групп (D) и (F); L — точка оптимума для групп (K) и (F); M — точка оптимума для системы (A').

Рассмотрим условия совместности трех систем (K) , (D) и (F) одновременно (рис. 7) При этом примем, что взятые попарно системы (K) и (F) , а также (D) и (F) совместны. Однако одного этого условия недостаточно для совместности всех трех систем (K) , (D) и (F) .

Могут быть случаи, когда при совместности попарно систем (K) и (F) и (D) и (F) системы (K) и (D) несовместны. Такой случай изображен на рис. 7 для точки M_1 или M_2 .

Напомним, что для совместности систем (K) , (D) и (F) должна существовать по крайней мере хотя бы одна точка плоскости, удовлетворяющая одновременно всем трем системам, т. е. она должна находиться в общей части областей (K) , (D) и (F) .

Общая часть многоугольников решений систем (K) , (D) и (F) будет также выпуклым многоугольником.

Для выяснения вопроса о совместности систем (K) , (D) и (F) поступаем следующим образом. Решая попарно все неравенства, составляющие системы (K) , (D) и (F) , находим координаты 25 возможных точек пересечения граничных прямых этих неравенств. Пусть это будут точки 1, 2, 3, 4, . . . , 22, 23, 24, 25.

Если координаты хотя бы одной из точек $(1 \div 25)$ пересечения граничных прямых неравенств систем (K) , (D) и (F) удовлетворяют всем без исключения неравенствам этих систем, то они совместны.

Если же координаты ни одной из точек $(1 \div 25)$ не удовлетворяют этому требованию, то системы (K) , (D) и (F) несовместны.

Точки, координаты которых удовлетворяют всем без исключения неравенствам систем (K) , (D) и (F) , являются вершинами многоугольника решений, общими для всех трех систем. Напомним, что многоугольник решений может состоять и из одной точки.

Дальнейшее решение задачи в случае совместности систем (K) , (D) и (F) производится по общим правилам, так же как для систем (K) и (F) , (D) и (F) , т. е., подставляя поочередно координаты вершин многоугольника решений систем (K) , (D) и (F) в линейную форму (136), находим ее значения.

Вершина многоугольника, координаты которой дают максимальное значение линейной формы (136), и является общей точкой оптимума, а ее координаты — оптимальным

решением $x_{2\text{опт}}^{(K, D)}$ и $x_{3\text{опт}}^{(K, D)}$ всех трех систем (K) , (D) и (F) .

Так как по условию системы (K) и (F) , а также (D) и (F) порознь совместны, то случай несовместности систем (K) и (D) может быть только тогда, когда вся область решений систем (D) и (F) лежит ниже граничной прямой неравенства (134) системы (K) , что очевидно из рис. 7. Следовательно, для совместности систем (K) и (D) при условии совместности каждой из них с системой (F) необходимо, чтобы граничная прямая неравенства (134) стала бы опорной прямой многоугольника решений систем (D) и (F) .

Последнее может быть достигнуто несколькими способами.

1. Будем перемещать граничную прямую неравенства (134) вниз по направлению к началу координат до встречи ее с ближайшей к ней вершиной многоугольника решений систем (D) и (F) . Эту вершину определим, подставляя на место переменных в уравнение граничной прямой (134) координаты всех вершин многоугольника решений (D) и (F) . Та из вершин, координаты которой при подстановке их в уравнение (134) дадут наибольшее значение его левой части, и будет вершиной, ближайшей к прямой (134).

Определив ближайшую вершину, уточняем значения $b_{1\text{ут}}$ или $b_{6\text{ут}}$, при которых системы (K) , (D) и (F) станут совместными. Координаты этой вершины будут в этом случае оптимальным решением систем (K) , (D) и (F) — $x_{2\text{опт}}^{(K, D)}$ и $x_{3\text{опт}}^{(K, D)}$.

2. Выясняем, какая из двух точек (24 или 25) пересечения граничных прямых (134) и (131) или (134) и (124) находится в пределах многоугольника $C_1C_3C_2C_4$ — области решений системы (F) . Если это точка (24) пересечения граничных прямых (134) и (131), то принимаем ее в качестве точки решения систем (K) , (D) и (F) и для приведения этих трех систем к совместному виду перемещаем в нее граничную прямую (124), для чего уточняем значение свободного члена $b_{6\text{ут}}$.

Если это точка (25) пересечения граничных прямых (134) и (124), то принимаем ее в качестве точки решения систем (K) , (D) и (F) и для приведения этих трех систем к совместному виду перемещаем в нее граничную прямую (131), для чего уточняем значения свободных членов $b_{1\text{ут}}$ и $b_{2\text{ут}}$. Этот случай изображен на рис. 7.

Если обе точки (24) и (25) лежат в области (F) , то из них в качестве общего решения систем (K) , (D) и (F) выбираем ту точку, координаты которой при подстановке их на место переменных в линейную форму (136) дают наибольшее значение этой формы.

Затем для приведения систем (K) , (D) и (F) к совместному виду перемещаем в выбранную точку вторую граничную прямую системы (D) и уточняем свободные члены $b_{1_{\text{ут}}}$ и $b_{2_{\text{ут}}}$ либо $b_{6_{\text{ут}}}$, в зависимости от того, какую прямую перемещаем в точку решения.

Таким образом, при приведении к совместному виду трех систем (K) , (D) и (F) могут встретиться следующие случаи уточнения свободных членов:

- 1) уточняются b_1 или b_5 ;
- 2) уточняются b_6 или b_1 и b_2 либо b_1 , b_2 и b_6 , в зависимости от случая уточнения.

Второй вариант проще в техническом отношении, если уточняются b_1 и b_6 , и равносложен первому, если уточняется b_2 .

Поэтому всегда условимся сначала испытывать второй вариант, а затем, в случае невозможности его применения, — первый.

Если ни одна из двух точек (24) или (25) не находится в пределах области (F) , то определяем, какие из четырех возможных точек (5), (6), (7) или (8) пересечения граничной прямой (134) с граничными прямыми, образующими область (F) , удовлетворяют всем четырем неравенствам (125), (126), (127) и (128), т. е. принадлежат области (F) , и из этих точек выбираем в качестве точки решения систем (K) , (D) и (F) ту, координаты которой при подстановке их вместо переменных в линейную форму (136) дают наибольшее ее значение $f'_{\text{опт}}(K, D)$. Выбрав общую точку решения для приведения систем (K) , (D) и (F) к совместному виду, уточняем значение свободных членов $b_{1_{\text{ут}}}$ или $b_{2_{\text{ут}}}$ и $b_{6_{\text{ут}}}$, что соответствует перемещению граничных прямых (131) и (124) в выбранную точку общего решения.

Во всех рассмотренных случаях несовместности систем (K) , (D) и (F) выбранная общая точка их решения (опорная точка) будет являться точкой оптимума, а ее координаты

$$x_{2_{\text{опт}}}^{(K, D)} \text{ и } x_{3_{\text{опт}}}^{(K, D)}$$

— оптимальным решением трех систем (K) , (D) и (F) .

Заметим, что во всех случаях согласования систем (K), (D) и (F) принимался вариант, требующий наименьшей степени модернизации станка или изменения инструмента и условий обработки, заданных техническими ограничениями.

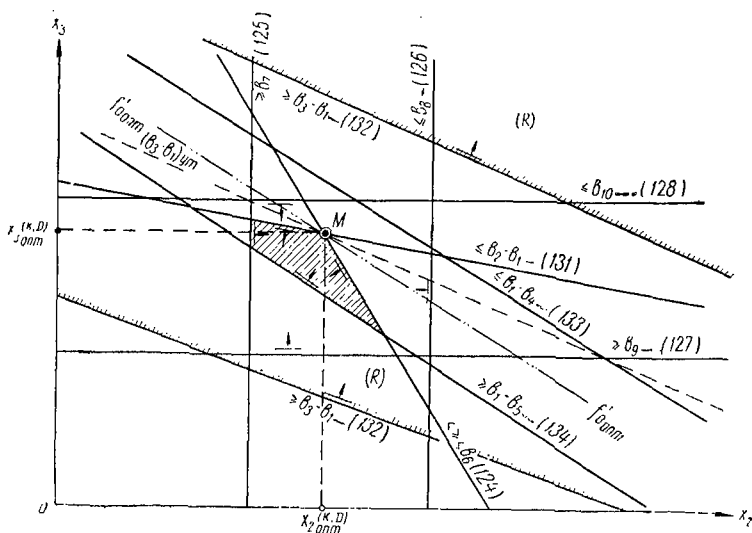


Рис. 8. Проверка соответствия оптимального решения системы (A') заданной производительности R:
(R) — область возможных решений по заданной производительности;
M — точка оптимума системы (A').

Рассмотрим соответствие полученного выше оптимального решения трех систем (K), (D) и (F) последнему из оставшихся неравенств системы (A'), а именно неравенству

$$(1 - y_v) x_2 + (1 - x_c) x_3 \geq b_3 - b_1,$$

определяющему область решений, принимаемых по заданной производительности станка (рис. 8).

Граничная прямая этого неравенства делит плоскость на две полуплоскости.

Полуплоскость, лежащая выше граничной прямой, всегда является областью возможных решений системы (A') по заданной производительности.

Если точка, соответствующая общему решению трех систем (K) , (D) и (F) , лежит в области возможных решений по заданной производительности, т. е. если удовлетворено неравенство

$$(1 - y_v) x_{2_{\text{опт}}}^{(K, D)} + (1 - x_v) x_{3_{\text{опт}}}^{(K, D)} \geq b_3 - b_1, \quad (148)$$

то система (A') полностью совместна и значения $x_{2_{\text{опт}}}^{(K, D)}$ и $x_{3_{\text{опт}}}^{(K, D)}$ могут быть приняты в качестве окончательных оптимальных решений системы. Если же неравенство (148) не удовлетворено, то система (A') — несовместна.

Для приведения системы (A') к совместному виду необходимо уточнить один из свободных членов b_1 или b_3 неравенства (132).

Уточненные значения свободных членов определяются из уравнений:

$$b_{1_{\text{ут}}} = b_3 - [(1 - y_v) x_{2_{\text{опт}}}^{(K, D)} + (1 - x_v) x_{3_{\text{опт}}}^{(K, D)}]; \quad (149)$$

$$b_{3_{\text{ут}}} = b_1 + [(1 - y_v) x_{2_{\text{опт}}}^{(K, D)} + (1 - x_v) x_{3_{\text{опт}}}^{(K, D)}]. \quad (150)$$

Во всех случаях необходимо стремиться сохранить заданную производительность неизменной, так как она является важнейшим техническим ограничением, определяющим эффективность проектируемого технологического процесса.

Никакой режим резания не может считаться оптимальным, если он не обеспечивает заданной производительности. Поэтому при уточнении свободных членов, в связи с несоответствием полученного решения заданной производительности, необходимо в первую очередь уточнять свободный член b_1 и затем, если его изменения окажется недостаточно для приведения системы (A') к совместному виду, уточнять свободный член b_3 . При этом изменять величину b_3 следует в первую очередь за счет увеличения числа одновременно обрабатываемых деталей r_R и уменьшения вспомогательного времени t_n и только в случае крайней необходимости уменьшать заданную производительность R до величины $R_{\text{ут}}$.

Возможны и другие варианты приведения системы (A') к совместному виду в случае несоответствия полученного решения заданной производительности. Эти варианты связаны с уточнением одновременно нескольких свободных

членов $\theta_2, \theta_4, \theta_6, \theta_8$, что технически сложно и неэкономично. Поэтому эти варианты не будем рассматривать и применять при расчетах, тем более, что средства, влияющие на изменение свободного члена θ_3 , обычно достаточны для достижения заданной производительности во всех реальных случаях обработки.

После того как найдены значения оптимального решения системы

$$x_{2\text{опт}} \text{ и } x_{3\text{опт}}$$

и она приведена к совместному виду, если в этом была необходимость, из уравнения (130) определяется оптимальная величина переменной x_1 , входящей в исходную систему (A):

$$x_{1\text{опт}} = b_1 - (y_v x_{2\text{опт}} + x_v x_{3\text{опт}}). \quad (151)$$

По значениям величин $x_{1\text{опт}}$, $x_{2\text{опт}}$ и $x_{3\text{опт}}$ на основании уравнений

$$n_{\text{опт}} = e^{x_{1\text{опт}}}; \quad (152)$$

$$s_{\text{опт}} = \frac{e^{x_{2\text{опт}}}}{100}; \quad (153)$$

$$t_{\text{опт}} = \frac{e^{x_{3\text{опт}}}}{100!}. \quad (154)$$

определяем значения элементов оптимального режима резания $n_{\text{опт}}$, $s_{\text{опт}}$ и $t_{\text{опт}}$.

Найденный таким образом оптимальный режим резания будет удовлетворять всем без исключения техническим ограничениям, входящим в систему (A), заданным исходными данными или уточненным впоследствии, в связи с приведением систем (K), (D), (F) и (A') к совместному виду.

Поскольку оптимальная глубина резания $t_{\text{опт}}$ может оказаться меньше припуска на обработку a , необходимо определить число черновых проходов $i_{\text{черн}}$ и глубину резания, остающуюся для последнего чистового прохода $t_{\text{чист}}$.

Число черновых проходов с оптимальным режимом резания, определяемым его элементами $n_{\text{опт}}$, $s_{\text{опт}}$ и $t_{\text{опт}}$, будет равно целой части частного от деления припуска на оптимальную глубину резания, т. е.

$$i_{\text{черн}} = \text{целой части от } \left(\frac{a}{t_{\text{опт}}} \right). \quad (155)$$

Глубина резания для последнего чистового прохода равна

$$t_{\text{чист}} = a - i_{\text{черн}} t_{\text{онт}}. \quad (156)$$

Полное число всех проходов черновых и чистовых будет равно

$$i = i_{\text{черн}} + 1. \quad (157)$$

В ряде случаев, когда припуск невелик, оптимальная глубина резания равна припуску, т. е.

$$t_{\text{онт}} = a,$$

а число всех проходов в этом случае $i = 1$.

Если не требуется последующей чистовой обработки, то решение заканчивается.

АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РЕЗАНИЯ ПРИ ОДНОИНСТРУМЕНТНОЙ ОБРАБОТКЕ НА УНИВЕРСАЛЬНОМ СТАНКЕ В НЕСКОЛЬКО ПРОХОДОВ

Ниже приводятся алгоритмы определения оптимальных режимов резания, разработанные на основании проведенных выше исследований математической модели этих режимов.

В соответствии с установившимися понятиями условимся под алгоритмом понимать точное предписание о выполнении в определенном порядке некоторой системы вычислительных и логических операций, необходимых для определения по заданным исходным данным элементов оптимального режима резания.

По алгоритмам могут быть разработаны рабочие программы для цифровых автоматических машин любого типа с учетом всех особенностей конкретной машины.

Для расчета оптимальных режимов резания необходимо иметь некоторые первичные сведения о технологическом процессе, станке, об обрабатываемой поверхности, о заготовке, способах базирования и крепления детали, организации и экономике производства и ряд других сведений.

Подробный перечень этих первичных сведений приведен в таблице 3.

На основании первичных сведений о технологическом процессе составляется таблица исходных данных для расчета.

Выборка чисел из внешней памяти машины и передача их в оперативную память, где обычно удобно располагать исходные данные для расчета, предусмотрена в конструкции каждой цифровой машины. Поэтому автоматизация переработки первичных данных о технологическом процессе в исходные данные для расчета не представляет затруднений.

При нежелании или при невозможности автоматизировать выборку исходных данных из таблиц этот процесс можно производить «вручную» и вводить в память машины уже непосредственно исходные данные для расчета.

Таблица 3

П е р е ч е н ь

исходных данных для расчета оптимальных режимов резания при одноинструментной обработке на универсальном станке

1. Сведения об операции

Наименование сведений	Обозначение	Размерность
1	2	3
Марка и основные размеры станка	Ст *	—
Минимальное число оборотов станка	$n_{ст. \min}$	об/мин
Максимальное число оборотов станка	$n_{ст. \max}$	об/мин
Наименьшая подача по кинематике станка $\times 100$	$s_{ст. \min}$	мм/об
Наибольшая подача по кинематике станка $\times 100$	$s'_{ст. \max}$	мм/об
Мощность электродвигателя станка	N_{II}	квт
Наибольшее усилие, допускаемое механизмом подачи станка	$P_{под. ст}$	кг

* Обозначения первичных сведений обведены рамкой.

1	2	3
Средний к. п. д. главного привода станка	η	—
Себестоимость станкоминуты работы станка и рабочего	E_p	коп/мин
Вспомогательное время на переход	t_1	мин
Способ установки детали на станок	$\overline{УД}$	—
Вес заготовки	$\overline{G_{заг}}$	кг
Способ базирования и зажима детали	$\overline{БЗ}$	—
Вспомогательное время на установку и выверку детали	t_2	мин
Сумма вспомогательных времен на переход	t_v	мин
Заданная производительность станка	R	шт/час
Количество одновременно обрабатываемых деталей	r_R	шт
Планируемый коэффициент загрузки станка $\times 60$	$K'_{загр}$	—
Наименование и марка обрабатываемого материала	$\overline{МД}$	—
Модуль упругости материала заготовки	$E_{заг}$	кг/мм ²
Модуль упругости материала державки резца	E_p	кг/мм ²
Способ изготовления и термической обработки заготовки	$\overline{ЗТ}$	—

1	2	3
Поправочный коэффициент, учитывающий влияние способа изготовления заготовки на скорость резания	K_8	—
Твердость по Бринеллю	H_B	кг/мм ²
Поправочный коэффициент, учитывающий влияние H_B на окружное усилие резания	K_{10}	—

II. Сведения о переходах

Тип режущего инструмента	И	—
Марка материала режущей части	МИ	—
Показатель относительной скорости резания (расчетный)	μ'	—
Показатель относительной стойкости	m	—
Расчетная минимальная допустимая скорость резания	v'_{min}	$\frac{м}{мин}$
Расчетная максимальная допустимая скорость резания	v'_{max}	$\frac{м}{мин}$
Расчетная минимальная допустимая глубина резания	t'_{min}	мм
Поправочный коэффициент, учитывающий влияние материала режущей части резца на скорость резания	K_9	—
То же типа режущего инструмента	K_{11}	—
То же вида обработки	K_{12}	—

1	2	3
Поправочный коэффициент, учитывающий влияние типа режущего инструмента на окружное усилие резания	K_{18}	—
То же на усилие подачи	K_{21}	—
Затраты на инструмент за период стойкости, связанные с износом	S_H	коп
Постоянный коэффициент в формуле скорости резания при обработке в несколько проходов	C'_v	—
То же в один проход	C''_v	—
Показатель степени в формуле скорости резания при глубине резания	x_v	—
То же при подаче	y_v	—
То же при диаметре обработки	z'_v	—
То же при твердости по Бринеллю	n_v	—
То же при числе зубьев фрезы	u_v	—
То же при ширине фрезерования	r_v	—
Постоянный коэффициент в формуле для определения окружного усилия резания	C_z	—
То же расчетный при обработке в несколько проходов	C'_z	—
То же расчетный при обработке в один проход	C''_z	—

1	2	3
Показатель степени в формуле окружного усилия резания при глубине резания	x_z	—
То же при подаче	y_z	—
То же при диаметре обработки	z_z	—
То же при твердости по Бринеллю	n_z	—
То же при числе зубьев фрезы	u_z	—
То же при ширине фрезерования	r_z	—
Постоянный коэффициент в формуле для определения усилия подачи	C_x	—
Показатель степени в формуле для определения усилия подачи при глубине резания	x_x	—
То же при подаче	y_x	—
То же при диаметре обработки	z_x	—
То же при твердости по Бринеллю	n_x	—
То же при числе зубьев фрезы	u_x	—
То же при ширине фрезерования	r_x	—
Способ установки и регулировки режущего инструмента	УИ	—

Продолжение таблицы 3

1	2	3
Класс точности обработки	ТО	—
Простой станка за время смены и регулировки инструмента	П	мин
Состояние обрабатываемой поверхности	СП	—
Поправочный коэффициент, учитывающий влияние состояния обрабатываемой поверхности на скорость резания	K_7	—
Припуск на сторону (расчетный)	a'	мм
Длина обрабатываемой поверхности	$L_{рез}$	мм
Длина рабочего хода	$L_{р-х}$	мм
Поправочный коэффициент, учитывающий влияние глубины сверления на скорость резания	K_{13}	—
Средняя квадратическая высота неровностей на обработанной поверхности	$H_{ск}$	мк
Наличие и вид охлаждения	W	—
Поправочный коэффициент, учитывающий влияние на скорость резания наличия и вида охлаждения	K_{14}	—
Вид обработки	ОД	—
Поправочный коэффициент в формуле для определения подачи при обработке отверстий	K_{23}	—

1	2	3
То же при нарезании резьбы	K_{24}	—
То же при черновом фрезеровании	K_{25}	—
То же при чистовом фрезеровании	K_{26}	—
То же на твердость по Бринеллю при определении скорости резания	$K_{НБ}$	—
То же при точении на жесткость реза	K_s	—
То же при точении на жесткость заготовки	$K_{ж}$	—
То же при фрезеровании на число зубьев фрезы	$K_{ф}$	—
Длина заготовки	$L_{заг}$	мм
Диаметр заготовки	$D_{заг}$	мм
Ширина фрезерования	B	мм
Шаг резьбы	h_p	мм
Число зубьев фрезы	z	—
Наибольший диаметр обработки	D	мм
Наименьший диаметр обработки	d	мм
Поправочный коэффициент на разницу диаметров при прорезке	K_{ϕ}	—

1	2	3
Поправочный коэффициент на диаметр расточки	K_{10}	—
Главный угол в плане	φ	град
Поправочный коэффициент, учитывающий влияние главного угла в плане на скорость резания	K_2	—
То же на окружное усилие резания	K_{15}	—
То же на усилие подачи	K_{20}	—
Вспомогательный угол в плане	φ_1	град
Поправочный коэффициент, учитывающий влияние вспомогательного угла в плане на скорость резания	K_3	—
Радиус закругления вершины резца	r	мм
Поправочный коэффициент, учитывающий влияние радиуса закругления вершины резца на скорость резания	K_4	—
То же на окружное усилие резания	K_{16}	—
Допустимый износ режущей кромки инструмента	δ	мм
Поправочный коэффициент, учитывающий влияние величины допустимого износа на окружное усилие резания	K_{17}	—
То же на усилие подачи	K_{22}	—

Продолжение таблицы 3

1	2	3
Вылет резца из державки	l_p	мм
Ширина сечения державки	b	мм
Высота сечения державки резца	h	мм
Поправочный коэффициент, учитывающий влияние на скорость резания площади сечения державки	K_1	—
Форма передней грани резца	Γ_p	—
Поправочный коэффициент, учитывающий влияние формы передней грани резца на скорость резания	K_8	—
Допустимый прогиб резца	f_p	мм
Допустимый прогиб заготовки	$f_{\text{заг}}$	мм
Постоянный коэффициент в формуле для определения подачи по чистоте обработки при точении	C_{Π}	—
Показатель степени в формуле для определения подачи при глубине резания	x_H	—
То же при углах в плане	z_{Π}	—
То же при H_B	n_H	—
То же при радиусе закругления вершины резца	u_H	—

1	2	3
Постоянная в формуле для определения подачи при черновом фрезеровании	C_{Φ}	—
Показатель степени при глубине резания в формуле подачи для черного фрезерования	x_{Φ}	—
То же при диаметре фрезы	z_{Φ}	—
То же при ширине фрезерования	r_{Φ}	—
Постоянная в формуле для определения подачи при чистовом фрезеровании	$C_{\text{ч}}$	—
Показатель степени при глубине резания в формуле подачи при чистовом фрезеровании	$x_{\text{ч}}$	—
То же при диаметре фрезы	$z_{\text{ч}}$	—
То же при H_B	$n_{\text{ч}}$	—
Вид и технологическое назначение обработки отверстия	$\boxed{\text{OO}}$	—
Постоянная в формуле для определения подачи при обработке отверстий	C_s	—
Показатель степени при диаметре инструмента	p	—

Если какие-либо данные не участвуют в определении оптимального режима резания для данного вида обработки, то вместо них в таблицу записывается ноль.

Исходные данные для расчета заносятся в оперативную или внешнюю память машины в зависимости от ее конст-

рукции и возможностей и выбираются оттуда по мере необходимости.

Если в процессе приведения к совместному виду систем линейных неравенств меняются те или иные исходные данные, то уточненные новые значения их заносятся в память машины на место первоначальных исходных данных.

При составлении алгоритмов некоторые выражения, входящие в формулы для определения постоянных, заменены одним символом, что нашло отражение в таблице исходных данных для расчета.

Введены следующие обозначения:

$$\mu' = \mu - 1; \quad (158)$$

$$C'_v = 100^{x_v + y_v} \cdot 318 C_v; \quad (159)$$

$$C'_z = \frac{100^{x_z + y_z} \cdot 975 \cdot 10^3 K_{Cz}}{C_z}; \quad (160)$$

$$K'_\phi = \frac{100}{K_\phi}; \quad (161)$$

$$K'_{\text{загр}} = 60 K_{\text{загр}}; \quad (162)$$

$$a' = 100a; \quad (163)$$

$$v'_{\min} = 318 v_{\min} \text{ и } v'_{\max} = 318 v_{\max}; \quad (164)$$

$$s'_{\text{ст. min}} = 100 s_{\text{ст. min}}; \quad (165)$$

$$s'_{\text{ст. max}} = 100 s_{\text{ст. max}}; \quad (166)$$

$$t'_{\min} = 100 t_{\min}; \quad (167)$$

$$z'_v = 1 - z_v. \quad (168)$$

Эти обозначения введены с целью экономии ячеек в оперативной памяти машины при вычислении свободных членов b , а также для упрощения аналоговых схем при построении моделирующих машин и приборов.

Ниже приведены логическая схема программы и алгоритмы определения оптимальных режимов резания при одноинструментной обработке в несколько проходов (рис. 9). Эти же алгоритмы могут быть использованы для определения режимов резания при обработке в один проход. В этом случае $t_{\text{опт}} = a$.

Если же необходим последующий чистовой проход, то расчет оптимального режима для него и моделирование определения оптимального режима резания производится

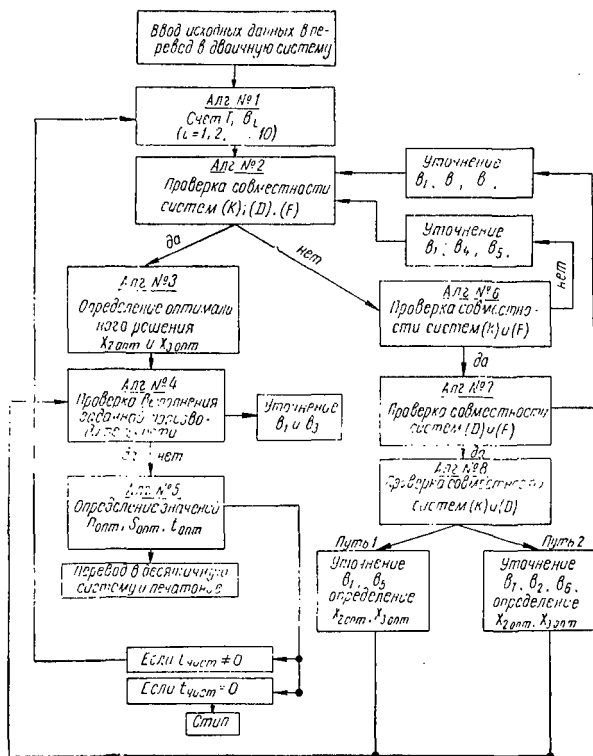


Рис. 9. Укрупненная логическая схема программы определения оптимальных режимов резания на универсальном станке.

по изложенному выше методу, принимая $a=t_{\text{чист}}$ по правилам и методике, изложенным в настоящей главе и несколько отличающимся от рассмотренных в связи с тем, что при определении чистового режима резания глубина резания t задана и необходимо определить только оптимальные число оборотов $n_{\text{опт}}$ и подачу $s_{\text{опт}}$.

На основании проведенных выше исследований может быть разработан алгоритм определения оптимального режима резания при одноинструментной сработке в один

и несколько проходов на универсальном станке. Этот алгоритм позволяет определить не только элементы оптимального режима резания для заданных конкретных условий обработки, но также направление и степень необходимой модернизации оборудования и других технических мероприятий, обеспечивающих реализацию оптимального режима.

При разработке алгоритма может быть принята следующая схема (рис. 9):

- 1) определение свободных членов неравенства $b_1, b_2, \dots, b_{10}$;
- 2) проверка совместности систем (K) , (D) и (F) ;
- 3) определение общего оптимального решения для трех систем (K) , (D) и (F) ;
- 4) проверка соответствия общего оптимального решения заданной производительности;
- 5) проверка совместности систем (K) и (F) ;
- 6) проверка совместности систем (D) и (F) ;
- 7) проверка совместности систем (K) и (F) ;
- 8) определение элементов оптимального режима резания в случае несовместности систем (K) , (D) и (F) .

Алгоритм № 1. Определение свободных членов b .

Если $K_{24} = 0$, то продолжать решение задачи.

Если $K_{21} = 1$, то перейти к реализации алгоритмов № 15 и 16.

$$T = \mu' \left(\Pi + \frac{S_{\Pi}}{E_p} \right);$$

$$K_v = \prod_{i=1}^{i=14} K_i;$$

$$A_1 = \frac{D^{z_v} \left(\frac{H_b}{K_{H_B}} \right)^{n_v} z''_v B^r_{vT} m}{C_v};$$

$$b_1 = \ln \left(\frac{K_v}{A_1} \right).$$

$$K_z = \prod_{i=15}^{i=19} K_i;$$

$$A_2 = \frac{C'_z \eta}{K_z D^2 z H_B^{n_z} z^{u_z} B^r z};$$

$$(b_2 = \ln(A_2 N_H)).$$

$$A_3 = K'_\phi L_{p.x} a';$$

$$b_3 = \ln \left(\frac{A_3}{\frac{K'_{загр} r_R}{R} - t_B} \right).$$

$$b_4 = \ln \left[\max \left(\frac{v'_{min}}{D}; \quad n_{ст. \min} \right) \right].$$

$$b_5 = \ln \left[\min \left(\frac{v'_{max}}{D}; \quad n_{ст. \max} \right) \right].$$

$$A_4 = K_s \frac{f_p E_{держ}^*}{4 C_z K_z H_B^{n_z}}; \quad \alpha = A_4 \frac{b h^3}{l_p^3};$$

$$A_5 = K_{ж} \frac{f_{заг} E_{заг} D_{заг}^4}{C_z K_z H_B^{n_z}}; \quad \beta = \frac{A_5}{L_{заг}^3};$$

$$A_6 = C_H (4 H_{ск})^{n_H}; \quad \gamma = A_6 \frac{r^{u_H}}{(\varphi \varphi_1)^{z_H}};$$

$$A_7 = \frac{K_{25} C_\phi}{B^r \phi}; \quad \varepsilon = A_7 D^{z_\phi};$$

$$A_8 = \frac{K_{26} C_r (4 H_{ск})^{n_r}}{z}; \quad \xi = A_8 D^{z_r};$$

$$A_9 = C_x D^{z_x} H_B^{n_x} z^{u_x} B^r x; \quad K_x = \prod_{i=20}^{i=22} K_i;$$

$$\nu = \frac{P_{под. ст}}{A_8 K_x};$$

$$\Phi = \min(\alpha \neq 0; \beta \neq 0; \gamma \neq 0; \varepsilon \neq 0; \xi \neq 0; \nu \neq 0).$$

* Перед счетом $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, \xi$ анализируются значения величин $K_s, K_{ж}, K_{25}, K_{26}$, которые могут быть равны нулю.

Если $\Phi =$	то	
	$x_s =$	$y_s =$
α	x_z	y_z
β	x_z	y_z
γ	x_{II}	1,0
ε	x_{Φ}	1,0
ξ	x_r	1,0
ν	x_x	y_x

$$b_6 = \ln(100^{x_s} \div y_s \Phi).$$

$$b_7 = \ln s'_{\text{ст. min}}; \quad b_8 = \ln s'_{\text{ст. max}};$$

$$b_9 = \ln t'_{\text{min}}; \quad b_{10} = \ln a'.$$

Машина отправляет в ЗУ $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, \alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, \xi, \nu, \Phi_s$ выдает их на печать и переходит к реализации алгоритма № 2.

Примечания: 1. Символ $\max\left(\frac{v'_{\min}}{D}; n_{\text{ст. min}}\right)$ означает, что

из значений двух величин $\frac{v'_{\min}}{D}$ или $n_{\text{ст. min}}$ нужно выбрать большее.

2. Символ $\min$ ($\alpha \neq 0; \beta \neq 0; \gamma \neq 0; \varepsilon \neq 0; \xi = 0; \nu = 0$) означает, что из всех значений величин $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, \xi, \nu$ исключаются все значения, равные нулю, и из оставшихся значений выбирается меньшее.

Алгоритм № 2. Проверка совместности систем $(K), (D)$ и (F) . Системы $(K), (D)$ и (F) заданы свободными членами $b_1, b_2, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}$ и коэффициентами при неизвестных $x_v, y_v, x_z, y_z, x_s, y_s$.

Найти координаты всех возможных точек пересечения граничных прямых систем $(K), (D)$ и (F) :

$$x_2^{(1)} = b_7; \quad x_3^{(1)} = \frac{(b_1 - b_4) - y_v b_7}{x_v};$$

$$\begin{aligned}
x_2^{(2)} &= b_8; \quad x_3^{(2)} = \frac{(b_1 - b_4) - y_v b_8}{x_v}; \\
x_2^{(3)} &= \frac{(b_1 - b_4) - x_v b_9}{y_v}; \quad x_3^{(3)} = b_9; \\
x_2^{(4)} &= \frac{(b_1 - b_4) - x_v b_{10}}{y_v}; \quad x_3^{(4)} = b_{10}; \\
x_2^{(5)} &= b_7; \quad x_3^{(5)} = \frac{(b_1 - b_5) - y_v b_7}{x_v}; \\
x_2^{(6)} &= b_8; \quad x_3^{(6)} = \frac{(b_1 - b_5) - y_v b_8}{x_v}; \\
x_2^{(7)} &= \frac{(b_1 - b_5) - x_v b_9}{y_v}; \quad x_3^{(7)} = b_9; \\
x_2^{(8)} &= \frac{(b_1 - b_5) - x_v b_{10}}{y_v}; \quad x_3^{(8)} = b_{10}; \\
x_2^{(9)} &= b_7; \quad x_3^{(9)} = b_9; \\
x_2^{(10)} &= b_7; \quad x_3^{(10)} = b_{10}; \\
x_2^{(11)} &= b_8; \quad x_3^{(11)} = b_9; \\
x_2^{(12)} &= b_8; \quad x_3^{(12)} = b_{10}; \\
x_2^{(13)} &= \frac{(b_2 - b_1) x_s - (x_z - x_v) b_6}{(y_z - y_v) x_s - (x_z - x_v) y_s}; \\
x_3^{(13)} &= \frac{(y_z - y_v) b_6 - (b_2 - b_1) y_s}{(y_z - y_v) x_s - (x_z - x_v) y_s}; \\
x_2^{(14)} &= b_7; \quad x_3^{(14)} = \frac{(b_2 - b_1) - (y_z - y_v) b_7}{x_z - x_v}; \\
x_2^{(15)} &= \frac{(b_2 - b_1) - (x_z - x_v) b_{10}}{y_z - y_v}; \quad x_3^{(15)} = b_{10}; \\
x_2^{(16)} &= b_8; \quad x_3^{(16)} = \frac{(b_2 - b_1) - (y_z - y_v) b_8}{x_z - x_v}; \\
x_2^{(17)} &= \frac{(b_2 - b_1) - (x_z - x_v) b_9}{y_z - y_v}; \quad x_3^{(17)} = b_9; \\
x_2^{(18)} &= b_7; \quad x_3^{(18)} = \frac{b_6 - y_s b_7}{x_s}; \\
x_2^{(19)} &= \frac{b_6 - x_s b_{10}}{y_s}; \quad x_3^{(19)} = b_{10}; \\
x_2^{(20)} &= b_8; \quad x_3^{(20)} = \frac{b_6 - y_s b_8}{x_s}; \\
x_2^{(21)} &= \frac{b_6 - x_s b_9}{y_s}; \quad x_3^{(21)} = b_9;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x_2^{(22)} &= \frac{(b_1 - b_4)x_s - x_v b_6}{y_v x_s - y_s x_v}; & x_3^{(22)} &= \frac{y_v b_6 - (b_1 - b_4)y_s}{y_v x_s - y_s x_v}, \\
x_2^{(23)} &= \frac{(b_1 - b_4)(x_z - x_v) - (b_2 - b_1)x_v}{y_v(x_z - x_v) - x_v(y_z - y_v)}, \\
x_3^{(23)} &= \frac{y_v(b_2 - b_1) - (b_1 - b_4)(y_z - y_v)}{y_v(x_z - x_v) - x_v(y_z - y_v)}, \\
x_2^{(24)} &= \frac{(b_1 - b_2)(x_z - x_v) - (b_2 - b_1)x_v}{y_v(x_z - x_v) - x_v(y_z - y_v)}, \\
x_3^{(24)} &= \frac{y_v(b_2 - b_1) - (b_1 - b_2)(y_z - y_v)}{y_v(x_z - x_v) - x_v(y_z - y_v)}, \\
x_2^{(25)} &= \frac{(b_1 - b_5)x_s - b_6 x_v}{y_v x_s - y_s x_v}; & x_3^{(25)} &= \frac{y_v b_6 - (b_1 - b_5)y_s}{y_v x_s - y_s x_v}.
\end{aligned}$$

Выделить вершины многоугольника решений систем (K) , (D) и (F) .

Вершинами многоугольника решений будут точки, удовлетворяющие всем без исключения неравенствам:

$$(A'') \left\{ \begin{aligned}
& (y_z - y_v)x_2^{(i)} + (x_z - x_v)x_3^{(i)} \leq b_2 - b_1; \\
& y_v x_2^{(i)} + x_v x_3^{(i)} \leq b_1 - b_4; \\
& y_v x_2^{(i)} + x_v x_3^{(i)} \geq b_1 - b_5; \\
& y_s x_2^{(i)} + x_s x_3^{(i)} \leq b_6; \quad (i = 1, 2, \dots, 25) \\
& x_2^{(i)} \geq b_7; \\
& x_2^{(i)} \leq b_8; \\
& x_3^{(i)} \geq b_9; \\
& x_3^{(i)} \leq b_{10}.
\end{aligned} \right.$$

Если имеется хотя бы одна точка, образующая вершину многоугольника, т. е. удовлетворяющая всем без исключения неравенствам системы (A'') , то системы (K) , (D) и (F) совместны.

Для всех точек, не удовлетворяющих системе (A'') , принимаем $x_2^{(i)} = 0$; $x_3^{(i)} = 0$.

Машина переходит к реализации алгоритма № 3.

Если ни одна из точек (1—25) не образует вершины многоугольника, т. е. не удовлетворяет хотя бы одному неравенству системы (A'') , то системы (K) , (D) и (F) несовместны.

Машина переходит к реализации алгоритма № 6.

Алгоритм № 3. Определение общего оптимального решения для трех систем (K), (D) и (F). Системы (K), (D) и (F) заданы свободными членами $b_1, b_2, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}$ и коэффициентами при неизвестных $x_v, y_v, x_z, y_z, x_s, y_s$.

Системы (K), (D) и (F) совместны.

Вершины многоугольника решений систем (K), (D) и (F) выделены.

Найти точку оптимума

$$f_i = (1 - y_v) x_2^{(i)} + (1 - x_v) x_3^{(i)}; \quad (i = 1, 2, \dots, 25)$$

$$f_{\text{опт}} = \max(f_i); \quad (i = 1, 2, \dots, 25)$$

Если

$$f_{\text{опт}} = f_{i_0},$$

то

$$x_{2\text{опт}}^{(K, D)} = x_2^{(i_0)}; \quad x_{3\text{опт}}^{(K, D)} = x_3^{(i_0)}. \quad (i = 1, 2, \dots, 25)$$

Машина переходит к реализации алгоритма № 4 или № 5*.

Алгоритм № 4. Проверка соответствия общего оптимального решения систем (K), (D) и (F) заданной производительности.** Задано общее оптимальное решение систем (K), (D) и (F):

$$x_{2\text{опт}}^{(K, D)}; \quad x_{3\text{опт}}^{(K, D)}.$$

Неравенство, характеризующее требуемую производительность станка, задано свободными членами b_1 и b_3 и коэффициентами при неизвестных $(1 - y_v)$ и $(1 - x_v)$.

Если

$$(1 - y_v) x_{2\text{опт}}^{(K, D)} + (1 - x_v) x_{3\text{опт}}^{(K, D)} \geq b_3 - b_1,$$

то общее оптимальное решение трех систем (K), (D) и (F)

* См. примечание к алгоритму № 4.

** Алгоритм № 4 обычно реализуется только при проектировании специальных станков и при определении режимов резания для станков, работающих в синхронизированном потоке, когда производительность станка задана и должна строго выдерживаться. При проектировании режимов резания для универсальных станков машина после реализации алгоритма № 3 переходит к алгоритму № 5.

удовлетворяет заданной производительности и принимается в качестве оптимального решения всей задачи:

$$x_{2\text{опт}} = x_{2\text{опт}}^{(K, D)}; \quad x_{3\text{опт}} = x_{3\text{опт}}^{(K, D)}.$$

Машина переходит к реализации алгоритма № 5.

Если

$$(1 - y_v) x_{2\text{опт}}^{(K, D)} + (1 - x_v) x_{3\text{опт}}^{(K, D)} < b_3 - b_1,$$

то общее оптимальное решение трех систем (K) , (D) и (F) не удовлетворяет заданной производительности.

В этом случае принять

$$x_{2\text{опт}} = x_{2\text{опт}}^{(K, D)}; \quad x_{3\text{опт}} = x_{3\text{опт}}^{(K, D)}$$

и уточнить значения b_1 , если они не уточнялись ранее при реализации алгоритмов № 6, 7 и 8 в случае несовместности систем (K) , (D) и (F) .

$$b_{1_{\text{yt}}} = b_3 - [(1 - y_v) x_{2\text{опт}}^{(K, D)} + (1 - x_v) x_{3\text{опт}}^{(K, D)}].$$

и

$$K_{v_{\text{yt}}} = A_1 e^{b_{1_{\text{yt}}}},$$

а также уточнить

$$b_{3_{\text{yt}}} = b_1 + [(1 - y_v) x_{2\text{опт}}^{(K, D)} + (1 - x_v) x_{3\text{опт}}^{(K, D)}];$$

$$r_{R_{\text{yt}}} = R \left(\frac{A_3 + t_v e^{b_{3_{\text{yt}}}}}{K'_{\text{загр}} e^{b_{3_{\text{yt}}}}} \right);$$

$$t_{d_{\text{yt}}} = \frac{K'_{\text{загр}} r_R}{R} - \frac{A_3}{e^{b_{3_{\text{yt}}}}};$$

$$R_{\text{yt}} = \frac{K'_{\text{загр}} r_R e^{b_{3_{\text{yt}}}}}{A_3 + t_v e^{b_{3_{\text{yt}}}}}.$$

Машина отправляет в ЗУ $b_{1_{\text{yt}}}$ и $b_{3_{\text{yt}}}$, выдаст на печать $b_{1_{\text{yt}}}$, $b_{3_{\text{yt}}}$, $t_{v_{\text{yt}}}$, $K_{v_{\text{yt}}}$, $r_{R_{\text{yt}}}$, R_{yt} и переходит к реализации алгоритма № 5.

Алгоритм № 5. Определение элементов оптимального режима резания.

Заданы $x_{2\text{опт}}$ и $x_{3\text{опт}}$.

$$x_{1\text{опт}} = b_1 - (y_v x_{2\text{опт}} + x_v x_{3\text{опт}});$$

$$n_{\text{опт}} = e^{x_{1\text{опт}}}; \quad s_{\text{опт}} = \frac{e^{x_{2\text{опт}}}}{100}; \quad t_{\text{опт}} = \frac{e^{x_{3\text{опт}}}}{100};$$

$$q = \frac{R}{R_{\text{ут}}}; \quad i_{\text{черн}} = \text{ц. ч.} \left(\frac{a}{t_{\text{опт}}} \right); \quad t_{\text{чист}} = a - t_{\text{опт}} i_{\text{черн}}.$$

$$t_{\text{маш}} = \frac{L_{\text{р.х}} i_{\text{черн}}}{n_{\text{опт}} s_{\text{опт}} z};$$

$$t_{\text{шт}} = (t_{\text{маш}} + t_{\text{в}}) 1,06.$$

Машина выдает на печать $n_{\text{опт}}$, $s_{\text{опт}}$, $t_{\text{опт}}$, q , $i_{\text{черн}}$, $t_{\text{чист}}$, $t_{\text{маш}}$, $t_{\text{в}}$, $t_{\text{шт}}$ и, если требуется, переходит к решению задачи определения режимов резания чистового прохода по алгоритмам № 1 ÷ 5, приняв $a = t_{\text{чист}}$.

Если чистовой проход не нужен, то машину останавливают.

Алгоритм № 6. Проверка совместности систем (K) и (F). Системы (K) и (F) заданы свободными членами b_1 , b_4 , b_5 , b_7 , b_8 , b_9 , b_{10} и коэффициентами при неизвестных x_v , y_v .

Если

$$y_v b_7 + x_v b_9 \leq b_1 - b_4$$

и

$$y_v b_8 + x_v b_{10} \geq b_1 - b_5,$$

то системы (K) и (F) совместны.

Машина переходит к реализации алгоритма № 7.

Если

$$y_v b_7 + x_v b_9 > b_1 - b_4,$$

то системы (K) и (F) несовместны.

Определить

$$b_{1\text{ут}} = b_4 + (y_v b_7 + x_v b_9)$$

и

$$K_{v_{\text{ут}}} = A_1 e^{b_{1\text{ут}}}.$$

Машина отсылает в ЗУ $b_{1_{\text{ут}}}$, выдает на печать $b_{1_{\text{ут}}}$ и $K_{v_{\text{ут}}}$ и переходит к реализации алгоритма № 2.

Если

$$y_v b_8 + x_v b_{10} < b_1 - b_5,$$

то системы (K) и (F) несовместны.

Определить

$$b_{1_{\text{ут}}} = b_5 + (y_v b_8 + x_v b_{10})$$

и

$$K_{v_{\text{ут}}} = A_1 e^{b_{1_{\text{ут}}}}.$$

Машина отсылает в ЗУ $b_{1_{\text{ут}}}$, выдает на печать $b_{1_{\text{ут}}}$ и $K_{v_{\text{ут}}}$ и переходит к реализации алгоритма № 2.

Алгоритм № 7. Проверка совместности систем (D) и (F).

Системы (D) и (F) заданы свободными членами $b_1, b_2, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}$ и коэффициентами при неизвестных $x_v, y_v, x_z, y_z, x_s, y_s$.

Если

$$(y_z - y_v) b_7 + (x_z - x_v) b_9 \leq b_2 - b_1$$

и

$$y_s b_7 + x_s b_9 \leq b_6,$$

то системы (D) и (F) совместны.

Машина переходит к реализации алгоритма № 8.

Если

$$(y_z - y_v) b_7 + (x_z - x_v) b_9 > b_2 - b_1,$$

то системы (D) и (F) несовместны.

Определить

$$b_{2_{\text{ут}}} = b_1 + [(y_z - y_v) b_7 + (x_z - x_v) b_9]$$

и

$$N_{n_{\text{ут}}} = \frac{e^{b_{2_{\text{ут}}}}}{A_2}.$$

Машина отсылает в ЗУ $b_{2_{\text{ут}}}$, выдает на печать $b_{2_{\text{ут}}}$ и $N_{n_{\text{ут}}}$ и переходит к реализации алгоритма № 2.

Если

$$y_s b_7 + x_s b_9 > b_6,$$

то системы (D) и (F) несовместны.

Определить

$$b_{6_{\text{ут}}} = y_s b_7 + x_s b_9$$

и

$$\Phi_{\text{ут}} = \frac{e^{b_{6_{\text{ут}}}}}{100^{x_s + y_s}}.$$

Подпрограмма № 1

Если до всех уточнений по результатам реализации алгоритма № 1

$\Phi =$	то определить
α	$l_{p_{\text{ут}}} = h \sqrt[3]{A_4 \frac{b}{\Phi_{\text{ут}}}}; (bh^3)_{\text{ут}} = \frac{\Phi_{\text{ут}} l_p^3}{A_4}$
β	$L_{\text{заг}_{\text{ут}}} = \sqrt[3]{\frac{A_5}{\Phi_{\text{ут}}}}$
γ	$(\varphi \varphi_1)_{\text{ут}} = \left(\frac{A_6 r^{u_H}}{\Phi_{\text{ут}}} \right)^{\frac{1}{z_H}}; r_{\text{ут}} = \left[\frac{\Phi_{\text{ут}} (\varphi \varphi_1)^{z_H}}{A_6} \right]^{\frac{1}{u_H}}$
ϵ	$D_{\text{ут}} = \left(\frac{\Phi_{\text{ут}}}{A_7} \right)^{\frac{1}{z_\Phi}}$
ξ	$D_{\text{ут}} = \left(\frac{\Phi_{\text{ут}}}{A_8} \right)^{\frac{1}{z_r}}$
ν	$P_{\text{под. ст}_{\text{ут}}} = A_9 K_{\nu} \Phi_{\text{ут}}; K_{\nu_{\text{ут}}} = \frac{P_{\text{под. ст}}}{A_9 \Phi_{\text{ут}}}.$

Машина отправляет в ЗУ $b_{6_{\text{ут}}}$, выдает на печать $b_{6_{\text{ут}}}$, $\Phi_{\text{ут}}$, $l_{p_{\text{ут}}}$, $(bh^3)_{\text{ут}}$, $L_{\text{заг}_{\text{ут}}}$, $(\varphi \varphi_1)_{\text{ут}}$, $r_{\text{ут}}$, $D_{\text{ут}}$, $P_{\text{под. ст}_{\text{ут}}}$, $K_{\nu_{\text{ут}}}$ и переходит к реализации алгоритма № 2.

Если

$$(y_z - y_v) b_7 + (x_z - x_v) b_9 > b_2 - b_1$$

и

$$y_s b_7 + x_s b_9 > b_6,$$

то системы (D) и (F) несовместны.

Определить

$$b_{2_{yt}} = b_1 - [(y_z - y_v) b_7 + (x_z - x_v) b_9];$$

$$N_{yt} = \frac{e^{b_{2_{yt}}}}{A_2};$$

$$b_{6_{yt}} = y_s b_7 + x_s b_9;$$

$$\Phi_{yt} = \frac{e^{b_{6_{yt}}}}{100^{x_s + y_s}}$$

и далее по подпрограмме № 1.

Машина отсылает в ЗУ $b_{2_{yt}}$ и $b_{6_{yt}}$, выдает на печать $b_{2_{yt}}$, $b_{6_{yt}}$, N_{yt} , Φ_{yt} и уточненные величины по подпрограмме № 1, затем переходит к реализации алгоритма № 2.

Алгоритм № 8. Проверка совместности систем (K) и (D).

Системы (K) и (D) заданы свободными членами b_1, b_4, b_5, b_2, b_6 и коэффициентами при неизвестных $x_v, y_v, x_z, y_z, x_s, y_s$.

Системы (K) и (F), а также (D) и (F) попарно совместны. Машина решает задачу по двум возможным вариантам.

Вариант 1. Выделить вершины многоугольника решений систем (D) и (F). Вершинами многоугольника решений систем (D) и (F) будут точки, координаты которых удовлетворяют всем без исключения неравенствам системы (A'''):

$$(A''') \left\{ \begin{array}{ll} (y_z - y_v) x_2^{(i)} + (x_z - x_v) x_3^{(i)} < b_2 - b_1; \\ y_s x_2^{(i)} + x_s x_3^{(i)} \leq b_6; \\ x_2^{(i)} & \geq b_7; \\ x_2^{(i)} & \leq b_8; \\ & x_3^{(i)} \geq b_9; \\ & x_3^{(i)} \leq b_{10}. \end{array} \right. \quad (i = 1, 2, \dots, 21)$$

Координаты точек, не удовлетворяющих хотя бы одному неравенству системы (A'''), принимать равными нулю:

$$x_2^{(i)} = 0 \quad \text{и} \quad x_3^{(i)} = 0.$$

Определить опорную вершину многоугольника решений систем (D) и (F) с граничной прямой

$$y_v x_2 + x_v x_3 \geq b_1 - b_5,$$

для чего определить

$$\omega_i = y_v x_2^{(i)} + x_v x_3^{(i)};$$

$$\Omega = \max(\omega_i). \quad (i = 1, 2, \dots, 21)$$

Если $\Omega = \omega_0^{(i)}$, то общее оптимальное решение для трех систем (K), (D) и (F) равно:

$$x_{2\text{опт}} = x_{2\text{опт}}^{(K, D)} = x_2^{(i_0)}; \quad x_{3\text{опт}} = x_{3\text{опт}}^{(K, D)} = x_3^{(i_0)}.$$

Определить

$$b_{1\text{ут}} = b_5 + (y_v x_{2\text{опт}}^{(K, D)} + x_v x_{3\text{опт}}^{(K, D)});$$

$$K_{v\text{ут}} = A_1 e^{b_{1\text{ут}}};$$

$$b_{5\text{ут}} = b_1 - (y_v x_{2\text{опт}}^{(K, D)} + x_v x_{3\text{опт}}^{(K, D)});$$

$$n_{\text{ст. max ут}} = e^{b_{5\text{ут}}}.$$

Машина отправляет в ЗУ $b_{1\text{ут}}$ или $b_{5\text{ут}}$, $x_{2\text{опт}}$, $x_{3\text{опт}}$, выдает на печать $x_{2\text{опт}}$, $x_{3\text{опт}}$, $b_{1\text{ут}}$, $b_{5\text{ут}}$, $K_{v\text{ут}}$, $n_{\text{ст. max ут}}$ и переходит к реализации алгоритма № 4.

Вариант 2. Выяснить, какая из двух точек — (24) или (25) — находится в области (F).

1. Если координаты точки (24) удовлетворяют всем без исключения неравенствам системы (F), а координаты точки (25) не удовлетворяют хотя бы одному неравенству этой системы, т. е. если

$$(F') \quad \left\{ \begin{array}{l} x_2^{(24)} \geq b_7; \quad x_3^{(24)} \geq b_9; \\ x_2^{(24)} \leq b_8; \quad x_3^{(24)} \leq b_{10}; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} x_2^{(25)} < b_7, \text{ или } x_2^{(25)} > b_8, \\ \text{или } x_3^{(25)} < b_9, \text{ или } x_3^{(25)} > b_{10}, \end{array} \right.$$

то

$$x_{2\text{опт}} = x_{2\text{опт}}^{(K, D)} = x_2^{(24)}; \quad x_{3\text{опт}} = x_{3\text{опт}}^{(K, D)} = x_3^{(24)}.$$

Уточнить значение свободного члена b_6 :

$$b_{6_{\text{YT}}} = y_s x_2^{(24)} + x_3 x_3^{(24)}$$

и

$$\Phi_{\text{YT}} = \frac{e^{b_{6_{\text{YT}}}}}{100 x_s + y_s}.$$

(Исходные данные определить по подпрограмме № 1.)

Направить в ЗУ уточненное значение $b_{6_{\text{YT}}}$, $x_{2_{\text{опт}}}$, $x_{3_{\text{опт}}}$, выдать на печать $x_{2_{\text{опт}}}$, $x_{3_{\text{опт}}}$, $b_{6_{\text{YT}}}$, Φ_{YT} и уточненные исходные данные, затем перейти к реализации алгоритма № 4.

2. Если координаты точки (25) удовлетворяют всем без исключения неравенствам системы (F), а координаты точки (24) не удовлетворяют хотя бы одному неравенству этой системы, т. е. если

$$(F'') \left\{ \begin{array}{l} x_2^{(25)} \geq b_7; x_3^{(25)} \geq b_9; \quad \left| \begin{array}{l} x_2^{(24)} < b_7, \text{ или } x_2^{(24)} > b_8, \\ \text{или } x_3^{(24)} < b_9, \text{ или } x_3^{(24)} > b_{10}, \end{array} \right. \\ x_2^{(25)} \leq b_8; x_3^{(25)} \leq b_{10}; \end{array} \right.$$

то

$$x_{2_{\text{опт}}} = x_2^{(K, D)} = x_2^{(25)}; \quad x_{3_{\text{опт}}} = x_3^{(K, D)} = x_3^{(25)}.$$

Уточнить значение свободных членов

$$b_{1_{\text{YT}}} = b_2 - [(y_z - y_v) x_2^{(25)} + (x_z - x_v) x_3^{(25)}]$$

и

$$K_{v_{\text{YT}}} = A_1 e^{b_{1_{\text{YT}}}},$$

а также

$$b_{2_{\text{YT}}} = b_1 + [(y_z - y_v) x_2^{(25)} + (x_z - x_v) x_3^{(25)}]$$

и

$$N_{n_{\text{YT}}} = \frac{e^{b_{3_{\text{YT}}}}}{A_2}.$$

Направить в ЗУ $b_{1_{\text{YT}}}$, $b_{2_{\text{YT}}}$, $x_{2_{\text{опт}}}$, $x_{3_{\text{опт}}}$, выдать на печать $x_{2_{\text{опт}}}$, $x_{3_{\text{опт}}}$, $b_{1_{\text{YT}}}$, $b_{2_{\text{YT}}}$, $K_{v_{\text{YT}}}$, $N_{n_{\text{YT}}}$ и перейти к реализации алгоритма № 4.

3. Если соблюдены обе системы (F') и (F''), т. е. обе точки — (24) и (25) — лежат в области (F), то выбрать из них опорную точку, для чего

определить

$$f_{21} = (1 - y_v) x_2^{(24)} + (1 - x_v) x_3^{(24)};$$

$$f_{25} = (1 - y_v) x_2^{(25)} + (1 - x_v) x_3^{(25)}.$$

Если

$$f_{21} > f_{25},$$

то

$$x_{2_{\text{опт}}} = x_2^{(24)}; \quad x_{3_{\text{опт}}} = x_3^{(24)}.$$

Уточнить

$$b_{6_{\text{ут}}} = y_s x_2^{(24)} + x_3 x_3^{(24)}$$

и

$$\Phi_{\text{ут}} = \frac{e^{b_{6_{\text{ут}}}}}{100^{x_s + y_s}}$$

и исходные данные по подпрограмме № 1.

Машина отправляет в ЗУ $b_{6_{\text{ут}}}$, $x_{2_{\text{опт}}}$, $x_{3_{\text{опт}}}$, выдает на печать $b_{6_{\text{ут}}}$, $\Phi_{\text{ут}}$ и уточненные исходные данные, затем переходит к реализации алгоритма № 4.

Если

$$f_{24} < f_{25},$$

то

$$x_{2_{\text{опт}}} = x_2^{(25)}; \quad x_{3_{\text{опт}}} = x_3^{(25)}.$$

Уточнить

$$b_{1_{\text{ут}}} = b_2 - [(y_z - y_v) x_2^{(25)} + (x_z - x_v) x_3^{(25)}]$$

и

$$K_{v_{\text{ут}}} = A_1 e^{b_{1_{\text{ут}}}},$$

а также

$$b_{2_{\text{ут}}} = b_1 + [(y_z - y_v) x_2^{(25)} + (x_z - x_v) x_3^{(25)}]$$

и

$$\psi N_{\text{н}_{\text{ут}}} = \frac{e^{b_{2_{\text{ут}}}}}{A_2}.$$

Машина отправляет в ЗУ $b_{1_{\text{ут}}}$, $b_{2_{\text{ут}}}$, $x_{2_{\text{опт}}}$, $x_{3_{\text{опт}}}$, выдает на печать $x_{2_{\text{опт}}}$, $x_{3_{\text{опт}}}$, $b_{1_{\text{ут}}}$, $b_{2_{\text{ут}}}$, $K_{v_{\text{ут}}}$, $N_{\text{н}_{\text{ут}}}$ и переходит к реализации алгоритма № 4.

4. Если не соблюдена ни одна из систем (F') или (F''), т. е. ни одна из точек—(24) или (25)—не находится в области (F), то выяснить, какие из точек—(5), (6), (7) или (8)—находятся в области (F).

Если координаты точки удовлетворяют всем без исключения неравенствам системы (F), т. е.

$$(F) \quad \left\{ \begin{array}{l} x_2^{(i)} \geq b_7; \\ x_2^{(i)} \leq b_8; \\ x_3^{(i)} \geq b_9; \\ x_3^{(i)} \leq b_{10}. \end{array} \right. \quad (i = 5, 6, 7, 8)$$

то точка находится в области (F).

Если не удовлетворено хотя бы одно неравенство системы (F), то точка не находится в области (F); принимать координаты такой точки

$$x_2^{(i)} = 0; \quad x_3^{(i)} = 0.$$

Найти координаты опорной точки:

$$f_i = (1 - y_v) x_2^{(i)} + (1 - x_v) x_3^{(i)}, \quad (i = 5, 6, 7, 8)$$

$$f_{\text{опт}} = \max(f_i).$$

Если

$$f_{2\text{опт}} = f_{i_0}, \quad (i = 5, 6, 7, 8)$$

то

$$x_{2\text{опт}} = x^{(i_0)}; \quad x_{3\text{опт}} = x_3^{(i_0)}.$$

Уточнить значения

$$b_{1y_T} = b_2 - [(y_z - y_v) x_2^{(i)} + (x_z - x_v) x_3^{(i)}];$$

$$b_{2y_T} = b_1 + [(y_z - y_v) x_2^{(i)} + (x_z - x_v) x_3^{(i)}];$$

$$b_{6y_T} = y_s x_2^{(i)} + x_s x_3^{(i)};$$

$$K_{vy_T} = A_1 e^{b_{1y_T}};$$

$$N_{ny_T} = \frac{e^{b_{2y_T}}}{A_2};$$

$$\Phi_{y_T} = \frac{e^{b_{6y_T}}}{100^{x_s} - y_s}$$

и далее по подпрограмме № 1.

Машина отсылает в ЗУ $b_{1\text{ут}}, b_{2\text{ут}}, b_{6\text{ут}}, x_{2\text{опт}}, x_{3\text{опт}}$, выдает на печать $x_{2\text{опт}}, x_{3\text{опт}}, b_{1\text{ут}}, b_{2\text{ут}}, b_{6\text{ут}}, K_{v\text{ут}}, N_{n\text{ут}}, \Phi_{\text{ут}}$ и уточненные исходные данные по подпрограмме № 1, затем переходит к реализации алгоритма № 4.

Примечание. Для отдельных видов обработки, например точения, сверления, фрезерования и т. п., могут быть разработаны сокращенные специализированные программы работы машины, включающие реализацию только алгоритмов № 1, 2, 3, 5. В этом случае при несовместности системы (А) предусматривается останов машины.

Алгоритм № 15. Определение режимов резания при резьбонарезании резцами на универсальных токарных станках.

Исходные данные для расчета

i — полное число проходов (черновых и чистовых) при нарезании резьбы резцом;

f_p — размер проточки в детали для выхода резца в мм;

h_p — шаг нарезаемой резьбы в мм;

$L_{p.x}$ — длина рабочего хода резца в мм;

g — число заходов резьбы;

t_v — вспомогательное время на операцию в мин.

При нарезании резьбы резцами на токарных универсальных станках, на деталях с ограниченными возможностями отвода резца и при необходимости переключения станка на обратный ход.

$$n = 25 \frac{f_p}{h_p};$$

$$t_{\text{маш}} = \frac{(l_{p.x} + f_p) i g}{n h_p};$$

$$t_{\text{шт}} = (t_{\text{маш}} + t_v) 1,06.$$

Машина выдает на печать $n, t_{\text{маш}}, t_{\text{шт}}$. Останов машины.

Алгоритм № 16. Определение режимов резания при нарезании резьбы метчиками, плашками, резьбонарезными самооткрывающимися головками, резцами-гребенками и резьбонарезными фрезами.

Исходные данные для расчета

$$v'_{\text{min}}, v'_{\text{max}}, n_{\text{ст. min}}, n_{\text{ст. max}}, N_n, \eta;$$

$$C_v, z_v, y_v, x_v, C_z, z_z, y_z;$$

$$D, T_{\text{расч.}}, m, S_p, S_z, L_{p.x}, \sigma, t_v.$$

Определить пределы возможных чисел оборотов:

$$n'_{min} = \frac{v'_{min}}{D}; \quad n''_{min} = n_{ст. min};$$

$$n'_{max} = \frac{v'_{max}}{D}; \quad n''_{max} = n_{ст. max};$$

$$n_{min} = \max(n'_{min}; n''_{min});$$

$$n_{max} = \min(n'_{max}; n''_{max}).$$

Определить расчетное число оборотов инструмента:

$$n_{расч} = \frac{318 K_v C_v D^{z_v - 1}}{T_{расч}^m S_p^{y_v} s_z^{x_z}} \text{ об/мин.}$$

Определить оптимальное число оборотов.

Если

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

то

$$n_{опт} = n_{расч}.$$

Если

$$n_{расч} > n_{max},$$

то

$$n_{опт} = n_{max}.$$

Если

$$n_{расч} < n_{min},$$

то

$$n_{опт} = n_{min}.$$

Определить крутящий момент на шпинделе (наибольший):

$$M_{кр} = 20 C_z K_z D^{z_z} S_p^{y_z} \text{ кгмм.}$$

Определить эффективную мощность на шпинделе:

$$N_{эф} = \frac{M_{кр} n_{опт}}{975 \cdot 000} \text{ кВт.}$$

При расчете режима резания для агрегатного станка или автоматической линии выдать на печать $n_{опт}$, $M_{кр}$, $N_{эф}$ и перейти к реализации следующего алгоритма.

При расчете режима резания для универсального станка или специального резьбонарезного, если

$$N_{эф} \leq \frac{N_H}{\eta},$$

то определить штучное время на операцию:

а) для метчиков и круглых плашек

$$t_{\text{маш}} = \frac{L_{\text{р. х}}}{n_{\text{опт}} h_{\text{р}}} + \frac{L_{\text{р. х}}}{1,25 n_{\text{опт}} h_{\text{р}}};$$

б) для самооткрывающихся головок

$$t_{\text{маш}} = \frac{L_{\text{р. х}}}{n_{\text{опт}} h_{\text{р}}};$$

в) для дисковых фрез

$$t_{\text{маш}} = \frac{\pi D L_{\text{р. х}}}{h_{\text{р}} s_z z n_{\text{опт}} \cos \tau};$$

г) для групповых фрез

$$t_{\text{маш}} = \frac{1,2 \pi D}{s_z z n_{\text{опт}}};$$

д) для резцов-гребенок

$$t_{\text{маш}} = \frac{L_{\text{р. х}}}{n h_{\text{р}}};$$

$$t_{\text{шт}} = (t_{\text{маш}} + t_{\text{п}}) \cdot 1,06; S_{\text{м}} = s_z z n_{\text{опт}} \text{ мм/мин};$$

$$n_{\text{изд}} = \frac{S_{\text{м}}}{\pi D} \text{ об/мин.}$$

Выдать на печать $n_{\text{опт}}$, $t_{\text{маш}}$, $t_{\text{шт}}$. Останов машины.

АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РЕЗАНИЯ ПРИ ОДНОИНСТРУМЕНТНОЙ ОБРАБОТКЕ В ОДИН ПРОХОД НА УНИВЕРСАЛЬНОМ СТАНКЕ

Исходные данные для расчета оптимальных режимов резания при одноинструментной обработке в один проход те же, что и при обработке в несколько проходов.

Отличие между расчетами заключается в том, что при обработке в один проход уже заранее известна глубина резания t , равная припуску на обработку a , и задачей расчета является нахождение только двух элементов оптимального режима резания: числа оборотов $n_{\text{опт}}$ и подачи $s_{\text{опт}}$, обеспечивающих оптимальный по заданному критерию режим резания.

При составлении алгоритма расчета оптимальных режимов резания при обработке в один проход могут встретиться два случая.

1. Расчет оптимального режима резания является самостоятельным расчетом, когда обработка данной поверх-

ности детали планируется в один проход точением, фрезерованием и во всех случаях обработки отверстий, т. е. при сверлении, рассверливании, зенкерования, развертывании, цековании, когда алгоритм обработки в один проход является обязательным.

2. Расчет оптимального режима резания в один проход является продолжением расчета при обработке в несколько проходов, когда удаление большого припуска с данной поверхности планируется за один или несколько черновых проходов и один чистовой проход (расчеты в данном случае относятся к чистовому проходу).

В первом случае глубина резания равна припуску на сторону, т. е.

$$t = a, \quad (169)$$

а во втором — глубине резания чистового прохода, т. е.

$$t = t_{\text{чист}}. \quad (170)$$

В настоящей главе приведены методы определения

$$t_{\text{чист}} = a - t_{\text{опт}} i_{\text{черн}},$$

где a — припуск на обработку в мм;

$t_{\text{опт}}$ — оптимальная, определенная расчетом, глубина резания при черновых проходах в мм;

$i_{\text{черн}}$ — число черновых проходов.

Алгоритм № 9. Определение свободных членов b' . (Продолжение расчета при обработке в несколько проходов.)

Свободные члены $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8$, а также $t_{\text{чист}}, x_v, y_v, x_z, y_z, x_s, y_s$ определены на предыдущем этапе расчета и хранятся в ЗУ машины.

Определить новые значения свободных членов b'_1, b'_2, b'_3, b'_6 :

$$\begin{aligned} x_3 &= \ln(100 t_{\text{чист}}); \\ b'_1 &= b_1 - x_v x_3; \quad b'_3 = b_3 - x_3; \\ b'_2 &= b_2 - x_z x_3; \quad b'_6 = b_6 - x_s x_3. \end{aligned}$$

Машина отсылает в ЗУ b'_1, b'_2, b'_3, b'_6 , выдает их на печать и переходит к реализации алгоритма № 10.

Примечание. Если свободные члены b_1, b_2, b_3, b_6 неизвестны и задача является самостоятельной, то предварительно до реализации алгоритма № 9, пользуясь алгоритмом № 1, следует определить $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8$ или вычислить их на основании формул (159), (160), (161), (162).

то

$$b'_{2_{\text{YT}}} = b_4 + y_2 b_7$$

и

$$N_{\text{нYT}} = \frac{e^{b'_{2_{\text{YT}}} (100t)^{x_z}}}{A_2};$$

$$x^{(D')}_{1_{\text{опт}}} = b_4; \quad x^{(D')}_{2_{\text{опт}}} = b_7.$$

Машина отсылает в ЗУ $b'_{2_{\text{YT}}}$, $x^{(D')}_{1_{\text{опт}}}$, $x^{(D')}_{2_{\text{опт}}}$, выдает на печать $b'_{2_{\text{YT}}}$ и $N_{\text{нYT}}$ и переходит к реализации алгоритма № 13.

Если

$$b'_2 \geq b_4 + y_2 b_7$$

и

$$b'_6 < y_3 b_7,$$

то

$$b'_{6_{\text{YT}}} = y_3 b_7$$

и

$$\Phi_{\text{YT}} = \frac{e^{b'_{6_{\text{YT}}} t^{x_s}}}{100^{y_s}}$$

и далее по подпрограмме № 1:

$$x^{(D')}_{1_{\text{опт}}} = b_4; \quad x^{(D')}_{2_{\text{опт}}} = b_7.$$

Машина отсылает в ЗУ $b'_{6_{\text{YT}}}$, $x^{(D')}_{1_{\text{опт}}}$, $x^{(D')}_{2_{\text{опт}}}$, выдает на печать $b'_{6_{\text{YT}}}$, Φ_{YT} и другие уточненные величины по подпрограмме № 1 и переходит к реализации алгоритма № 13.

Если

$$b'_2 < b_4 + y_2 b_7$$

и

$$b'_6 < y_3 b_7,$$

то

$$b'_{2_{\text{YT}}} = b_4 + y_2 b_7; \quad N_{\text{нYT}} = \frac{e^{b'_{2_{\text{YT}}} (100t)^{x_z}}}{A_2};$$

$$b'_{6_{\text{YT}}} = y_3 b_7; \quad \Phi_{\text{YT}} = \frac{e^{b'_{6_{\text{YT}}} t^{x_s}}}{100^{y_s}}$$

и далее по подпрограмме № 1:

$$x^{(D')}_{1_{\text{опт}}} = b_4; \quad x^{(D')}_{2_{\text{опт}}} = b_7.$$

Машина отсылает в ЗУ $b'_{2_{\text{ут}}}$ и $b'_{6_{\text{ут}}}$, $x^{(D')}_{1_{\text{онт}}}$ и $x^{(D')}_{2_{\text{онт}}}$, выдает на печать $b'_{2_{\text{ут}}}$, $b'_{6_{\text{ут}}}$, $N_{\text{ут}}$, $\Phi_{\text{ут}}$ и другие уточненные величины и переходит к реализации алгоритма № 13.

Алгоритм № 11. Проверка совместности систем (K') и (D') .

Системы заданы свободными членами $b'_1, b'_2, b_4, b_5, b'_6, b_7, b_8$ и коэффициентами при неизвестных y_v, y_z, y_s .

Система (D') совместна.

Определить координаты всех возможных точек пересечения граничных прямых системы (D') .

$$\begin{array}{l|l} x_1^{(3)} = b_4; & x_2^{(3)} = b_7; \\ x_1^{(4)} = b_5; & x_2^{(4)} = b_7; \\ x_1^{(5)} = b_5; & x_2^{(5)} = b_8; \\ x_1^{(6)} = b_4; & x_2^{(6)} = b_8; \\ x_1^{(7)} = b'_2 - y_z b_7; & x_2^{(7)} = b_7; \\ x_1^{(8)} = b_5; & x_2^{(8)} = \frac{b'_2 - b_5}{y_z}; \end{array} \quad \begin{array}{l} x_1^{(9)} = b'_2 - \frac{y_z}{y_s} b'_6; \quad x_2^{(9)} = \frac{b'_6}{y_s}; \\ x_1^{(10)} = b'_2 - y_z b_8; \quad x_2^{(10)} = b_8; \\ x_1^{(11)} = b_4; \quad x_2^{(11)} = \frac{b'_2 - b_4}{y_z}; \\ x_1^{(12)} = b_5; \quad x_2^{(12)} = \frac{b'_6}{y_s}; \\ x_1^{(13)} = b_4; \quad x_2^{(13)} = \frac{b'_6}{y_s}. \end{array}$$

Выделить вершины многоугольника решений системы (D') .

Если не удовлетворено хотя бы одно из неравенств

$$x_1^{(i)} + y_z x_2^{(i)} \leq b'_2; \quad x_2^{(i)} \geq b_7;$$

$$y_s x_2^{(i)} \leq b'_6; \quad x_2^{(i)} \leq b_8.$$

$$x_1^{(i)} \geq b_4;$$

$$x_1^{(i)} \leq b_5, \quad (i = 3, 4, \dots, 13),$$

то принимать

$$x_1^{(i)} = 0; \quad x_2^{(i)} = 0.$$

Если

$$b'_1 \leq \max (x_1^{(i)} + y_v x_2^{(i)}), \quad (i = 3, 4, \dots, 13)$$

и

$$b'_1 \geq b_4 + y_v b_7,$$

то системы (K') и (D') совместны.

Машина переходит к реализации алгоритма № 12.

Если

$$b'_1 > \max(x_1^{(i)} + y_v x_2^{(i)}), \quad (i = 3, 4, \dots, 13),$$

то

$$b'_{1_{\text{ут}}} = \max(x_1^{(i)} + y_v x_2^{(i)})$$

и

$$K_{v_{\text{ут}}} = e^{b'_{1_{\text{ут}}}} \frac{(100t)^{x_v}}{A_1};$$

$$x_{1_{\text{опт}}}^{(K', D')} = x_1^{(i)}; \quad x_{2_{\text{опт}}}^{(K', D')} = x_2^{(i)};$$

i — порядковый номер вершины, в которой достигается

$$\max(x_1^{(i)} + y_v x_2^{(i)}).$$

Машина отправляет в ЗУ $b'_{1_{\text{ут}}}$, $x_{1_{\text{опт}}}^{(K', D')}$, $x_{2_{\text{опт}}}^{(K', D')}$, выдает на печать $b'_{1_{\text{ут}}}$ и $K_{v_{\text{ут}}}$ и переходит к реализации алгоритма № 13.

Если

$$b'_1 < b_4 + y_v b_7,$$

то

$$b'_{1_{\text{ут}}} = b_4 + y_v b_7$$

и

$$K_{v_{\text{ут}}} = e^{b'_{1_{\text{ут}}}} \frac{(100t)^{x_v}}{A_1};$$

$$x_{1_{\text{опт}}}^{(K', D')} = b_4; \quad x_{2_{\text{опт}}}^{(K', D')} = b_7.$$

Машина отправляет в ЗУ $b'_{1_{\text{ут}}}$, $x_{1_{\text{опт}}}^{(K', D')}$, $x_{2_{\text{опт}}}^{(K', D')}$, выдает на печать $b'_{1_{\text{ут}}}$ и $K_{v_{\text{ут}}}$ и переходит к реализации алгоритма № 13.

Алгоритм № 12. Определение общего оптимального решения для систем (K') и (D') .

Системы заданы свободными членами b'_1 , b'_2 , b_4 , b_5 , b'_6 , b_7 , b_8 и коэффициентами при неизвестных y_v , y_2 , y_s ,

Определить координаты точек (14), (15), (16), (17):

$$x_1^{(14)} = b'_1 - \frac{y_v}{y_s} b'_6; \quad x_2^{(14)} = \frac{b'_6}{y_s};$$

$$x_1^{(15)} = b'_1 - y_v b_8; \quad x_2^{(15)} = b_8;$$

$$x_1^{(16)} = b_4; \quad x_1^{(16)} \frac{b'_1 - b_4}{y_v};$$

$$x_1^{(17)} = \frac{(y_v - y_z) b'_1 - (b'_1 - b'_2)}{y_v - y_z}; \quad x_2^{(17)} = \frac{b'_1 - b'_2}{y_v - y_z}.$$

Если

$$x_1^{(i)} + y_z x_2^{(i)} \leq b'_2; \quad x_1^{(i)} \geq b_4;$$

$$y_s x_2^{(i)} \leq b'_6; \quad x_2^{(i)} \leq b_8, \quad (i = 14, 15, 16, 17),$$

то

$$x_{1\text{опт}}^{(K', D')} = x_1^{(i)}; \quad x_{2\text{опт}}^{(K', D')} = x_2^{(i)}.$$

Машина отправляет в ЗУ $x_{1\text{опт}}^{(K', D')}$ и $x_{2\text{опт}}^{(K', D')}$ и переходит к реализации алгоритма № 13.

Алгоритм № 13. Проверка общего оптимального решения по заданной производительности*.

Система (B) задана свободными членами $b'_1, b'_2, b'_3, b_4, b_5, b'_6, b_7, b_8$ и коэффициентами при неизвестных y_v, y_z, y_s .

Если

$$b'_3 \leq x_{1\text{опт}}^{(K', D')} + x_{2\text{опт}}^{(K', D')},$$

то система (B) совместна, заданная производительность может быть достигнута при оптимальном режиме резания.

Принять

$$x_{1\text{опт}} = x_{1\text{опт}}^{(K', D')}; \quad x_{2\text{опт}} = x_{2\text{опт}}^{(K', D')}.$$

Машина переходит к реализации алгоритма № 14.

Если

$$b'_4 > x_{1\text{опт}}^{(K', D')} + x_{2\text{опт}}^{(K', D')},$$

то

$$b'_{3\text{ут}} = x_{1\text{опт}}^{(K', D')} + x_{2\text{опт}}^{(K', D')}$$

и

$$r_{R\text{ут}} = R \left(\frac{\frac{A_3}{100t} + t_b e^{b'_{3\text{ут}}}}{K'_{3\text{згп}} e^{b'_{3\text{ут}}}} \right);$$

* См. примечание к алгоритму № 4.

$$t_{\text{ут}} = \frac{K'_{\text{загр}} r_R}{R} - \frac{\frac{A_3}{100t}}{e^{b'_{3\text{ут}}}};$$

$$R_{\text{ут}} = \frac{K'_{\text{загр}} r_R e^{b'_{3\text{ут}}}}{\frac{A_3}{100t} + t_b e^{b'_{3\text{ут}}}}; \quad x_{1\text{онт}} = x_{1\text{онт}}^{(K', D')}; \quad x_{2\text{онт}} = x_{2\text{онт}}^{(K', D')}.$$

Машина отправляет в ЗУ $b'_{3\text{ут}}$, выдает на печать $b'_{3\text{ут}}$, $r_{R\text{ут}}$, $t_{b\text{ут}}$, $R_{\text{ут}}$ и переходит к реализации алгоритма № 14.

Алгоритм № 14. Определение элементов оптимального режима резания.

Заданы $x_{1\text{онт}}$, $x_{2\text{онт}}$.

$$n_{\text{онт}} = e^{x_{1\text{онт}}}; \quad s_{\text{онт}} = \frac{e^{x_{2\text{онт}}}}{100};$$

$$t_{\text{маш}} = \frac{L_{\text{р.х}}}{n_{\text{онт}} s_{\text{онт}} z}; \quad t_{\text{шт}} = (t_{\text{маш}} + t_{\text{в}}) 1,06.$$

Машина выдает на печать $n_{\text{онт}}$, $s_{\text{онт}}$, $t_{\text{маш}}$, $t_{\text{в}}$, $t_{\text{шт}}$.
Останов машины.

Примечание. Для отдельных видов обработки могут быть разработаны сокращенные специализированные программы работы машины, включающие реализацию только алгоритмов № 9, (1), 11, 12, 14. В случае несовместности системы (K') и (D') предусматривается останов машины.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ
ПРИ МНОГОИНСТРУМЕНТНОЙ ОБРАБОТКЕ
НА АГРЕГАТНЫХ СТАНКАХ И АВТОМАТИЧЕСКИХ
СТАНОЧНЫХ ЛИНИЯХ**

Агрегатными называются специальные металлорежущие станки, составленные из стандартных нормализованных узлов. Они применяются в крупносерийном и массовом производствах для выполнения сверлильных, расточных, резьбонарезных, фрезерных, токарных и других работ.

Обрабатываемая деталь, как правило, закрепляется на агрегатном станке неподвижно в приспособлении, установленном на столе станка, и обрабатывается с одной, двух или нескольких сторон одновременно многими инструментами, закрепленными в шпинделях станка.

В зависимости от типа агрегатного станка шпиндели приводятся во вращение и получают осевую подачу одним из следующих способов.

1. Каждый шпиндель (или небольшая группа шпинделей) приводится во вращение от отдельной силовой головки и получает от нее осевую подачу независимо от других инструментов. По такой схеме работают малые агрегатные станки, оснащенные силовыми головками небольшой мощности и предназначенные, как правило, для обработки мелких и средних деталей.

2. Все шпиндели (или группа шпинделей) приводятся во вращение от одной силовой головки и получают от нее осевую подачу. Эти шпиндели закреплены в одном агрегате — шпиндельной коробке и могут перемещаться в осевом направлении только с одной скоростью, равной скорости дви-

жения подачи коробки. Назначением шпиндельной коробки является передача вращения от приводного вала силовой головки к рабочим шпинделям, в которых установлены режущие инструменты. По такой схеме работают агрегатные станки, предназначенные для обработки средних и крупных деталей и оснащенные силовыми головками большой мощности.

Силовые головки являются основными нормализованными узлами агрегатного станка. Они сообщают режущим инструментам как вращение, так и движение подачи. Вращение инструменту сообщается электродвигателем силовой головки, а движение подачи — различными механизмами: гидравлическими, механическими, пневматическими, кулачковыми и другими.

Характеристики различных силовых головок, изготовляемых в СССР, приведены в табл. 4.

Комбинируя несколько силовых головок, шпиндельных коробок и других узлов и располагая их на станинах различной формы, получают разнообразные по назначению агрегатные станки.

Соединяя несколько агрегатных станков транспортными устройствами для передачи деталей от станка к станку, получают различные автоматические линии из агрегатных станков.

Автоматические линии из агрегатных станков получили в машиностроении большое распространение для обработки самых разнообразных деталей.

Количество головок и шпиндельных коробок и их компоновка в станке или в автоматической линии зависят от формы и размеров обрабатываемой детали и от характера выполняемых операций.

При определении оптимальных режимов резания для инструментов, работающих в инструментальных наладках агрегатных станков и автоматических станочных линий, необходимо учитывать особенности этих станков и специфику работы на них различных инструментов и, следовательно, дополнительные, возникающие в связи с этим технические ограничения режима резания.

Расчет режимов резания на агрегатных станках и автоматических линиях производится обычно после того, как намечен план обработки, выбраны инструменты, обработка подразделена по позициям станка и установлен припуск на каждой позиции.

Особенностями, отличающими работу режущих инструментов в многоинструментных наладках агрегатных станков и автоматических линий от работы инструмента на одноинструментном станке, являются следующие:

1. Обработка производится каждым инструментом в один проход с глубиной резания $t=a$, где a — припуск на обработку для данного прохода.

2. Все инструменты, расположенные в одной шпиндельной коробке, имеют общие: минутную подачу S_m , длину рабочего хода L_{px} и время рабочего хода t_{px} .

3. Время цикла работы каждого инструмента и каждой силовой головки равно времени цикла работы станка.

4. Во время цикла или рабочего хода разные инструменты наладки нагружены неравномерно.

5. По мере увеличения количества одновременно работающих на одном станке или в линии инструментов возрастает продолжительность простоев станка, необходимых для периодической подналадки и смены инструментов. В связи с этим при работе с экономическими режимами резания значительно возрастает расчетный период стойкости режущих инструментов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОЙКОСТЕЙ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ МНОГОИНСТРУМЕНТНЫХ НАЛАДОК АГРЕГАТНЫХ СТАНКОВ И АВТОМАТИЧЕСКИХ СТАНОЧНЫХ ЛИНИЙ

Эффективность любой многоинструментной наладки в значительной степени зависит от правильного выбора исходных расчетных данных и, в первую очередь, расчетной стойкости режущих инструментов.

Этот сам по себе сложный вопрос еще более осложняется необходимостью учета новых специфических для многоинструментной обработки факторов: наличие в одной наладке большого числа различных инструментов с различными характеристиками, необходимость установления общего периода работы между переточками для групп инструментов, сменяемых одновременно, и ряд других факторов.

В задачу настоящей работы не входит подробный анализ различных факторов, влияющих на выбор периодов стойкости при многоинструментной работе.

При разработке методики расчета периодов стойкости учтены возможности, которые дает проектировщику применение автоматических вычислительных машин.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Проектировщик, завод-изготовитель или фирма	Габарит	Много- или одношпиндельная	Шифр головки	Механизм подачи	Источник подачи	Усилия подачи в кг	Длина общего хода в мм	Скорость быстрого перемещения в м/мин	Диапазон рабочих подач в мм/мин
СКБ-1 (Моск-ва)	2	Многошпиндельная	ЗУ 4021			950	200	8,5	35—900
			ЗУ 4022						
			ЗУ 4023						
	3	Одношпиндельная	ЗУ 4027			900	200	8,5	35—900
			ЗУ 4031						
			ЗУ 4032						
»	3	Многошпиндельная	ЗУ 4033			1 800	600	5,5	20—450
			ЗУ 4037						
			Одношпиндельная						
	4	Многошпиндельная	ЗУ 4041			2 500	400; 600; 800	9,0	20—1 250
			ЗУ 4051						
			ЗУ 4061						
»	5	Многошпиндельная	ЗУ 4051			5 000	400; 600; 800; 1 000	6,0	10—650
			ЗУ 4051						
			ЗУ 4061						
	6	Многошпиндельная	ЗУ 4061			11 000	400; 600; 800; 1 000	3,5	4,5—310
			ЗУ 4061						
			ЗУ 4061						

СКБ-1	3	Многошпиндельная	ЗУ 4531	Головки гидравлические несамодельные	Гидравлический вытесняющий	900	200; 400; 600	8,5	35—900
»	4		ЗУ 4541			1 800	600	5,5	20—450
»	5		ЗУ 4551			2 500	400	8,0	20—1 250
»	6	Многошпиндельная	ЗУ 4561	Головки гидравлические несамодельные	Гидравлический вытесняющий	3 500	600	7,0	14—950
»	7		ЗУ 4561			5 000	400; 800; 600; 1 000	6,0	10—650
»	8		ЗУ 4561			8 000	600; 1 000	4,0	7—450
»	9	Многошпиндельная	ЗУ 4561	Головки гидравлические несамодельные	Гидравлический вытесняющий	11 000	400; 600; 800; 1 000	3,5	4,5—310
»	10		ЗУ 4561			8 000	800; 1 000	5,0	7—450
»	11		ЗУ 4561			8 000	800; 1 000	5,0	7—450

Таблица 4

ловки, изготавливаемые в СССР

Число об/мин (вых. вала)	Способ изме- нения величин подач	Мощность электродвига- теля в кВт	К-во электро- двигателей	Габариты в мм			Вес в кг	Положение электро- двигателя	Примечание
				ширина	длина	высота			
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
710	Бесступенчатый	1,7÷ ÷2,8	1	433	927	525	450÷500	Сзади	
—					967		400÷450	Сзади	
								Наверху	
720		2,8÷ ÷4,5	1	491	1 037	620	600÷750	Сзади	
—					1 084		500÷650	Сзади	
								Наверху	
720		4,5÷7	1	636	1 360 1 560 1 815	730	800÷1 000	Сзади	
730		7;10; 14	1	786	1 560 1 760 1 960 2 260	835	1 250÷ ÷1 750	или	
730		7;10; 14;20; 28	1	946	1 810 2 010 2 210 2 410	960	1 950÷ ÷2 600	наверху	

720	Бесступенчатый	2,8	2	365	1 037 1 084	581	—	Сзади	
720		4,5;7	2	475	1 360 1 580 1 815	738	—		
730		7;10; 14	2	615	1 560 1 760 1 960 2 260	870	—		
730		10;14; 20;28	2	745	1 810 2 010 2 210	1033	—		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
СКБ-1	4			Столы силовые	Гидравлич. вынесен.	2 500 3 500	400; 600 800	9,0 7,0	20—1 250 14—950
»	5					5 000 8 000	400; 600 800; 1 000	6,0 4,0	10—650 7—450
»	6					11 000 8 000	400; 600 800; 1 000	3,5 5,0	4,5—310 7—450
ХМАС (Сара- тов)	»		—	Гидравлич. самодейств.	Гидравлич.	—	220	10,0	
»	»		АУ332			200	100	—	
»	»		АУ350			300	130	—	

ЗИЛ (Моск- ва)		Ст. 491/А	Гидравлич. самодейств.	Гидравлич.	1 100 650	120 130	1,2 1,2	10÷480 25÷500
»		Ст. 522						

ЗИЛ (Моск- ва)		Одно- шпин- дель- ная	Ст. 492	500	120	0,4÷ ÷0,6	0,8÷1,5
МЗА-1 (Минск)	2	Одно- шпин- дель- ная	УМ-2223	1 200	400; 300	5,5	17÷246
»	3		УМ-2233	2 500	400; 500	5,0	10,2÷220
»	4		УМ-2243	3 200	500; 800	4,5	10,6÷ ÷335
»	5	Многошпиндельная	УМ-2253	6 000	500; 800	5,0	10,9÷ ÷349

Самодействующие электромеханические
Винтовой встроенный

Продолжение таблицы 4

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
—	Бесступенчатый	—	1	485	1 360 1 560 1 815	285			
—		—	1	645	1 560 1 760 1 960 2 260	350		—	
—		—	1	805	1 810 2 010 2 210 2 410	405			
		1,4	1	252	820	490	180	Сзади	
1 000 ÷ ÷ 3 000	—	0,4	1	—	—	—		Сзади	
250 ÷ ÷ 970	Ступенч.	1,47	1	275	850	—	107	Сзади	
196 ÷ ÷ 922	сменой шест.	1,7 2,8 4,5	1	310	1 000	370	130	Сзади	Пинольного типа
200 ÷ ÷ 920	сменой шест.	1,47	1	230	550 ÷ ÷ 990*	—	—	Сзади	Пинольного типа
196— — 922	—	1,0 4,7 2,8	1	310	750	370	—	Сзади	
465 710	ступ. (смена шест.)	1,0; 1,7 2,8 (0,6)	2	270	1 570 (1 470)*	470	360	Сзади	
465 720	ступ. (смена шест.)	1,0; 1,7 2,8 4,5 (1,0)	2	340	1 900 (1 800)*	625	430	или	
465 720	ступ. (смена шест.)	2,8 4,5 7,0 (1,7)	2	625	2 425 (2 125)*	660	1 080	сбоку	
475 730	ступ. (смена шест.)	7; 14 (2,8)	2	720	2 720 (2 420)*	755	1 700		

*Длина головки одного и того же габарита зависит от длины хода головки.

В зависимости от характера работы инструментов в различных наладках и от принятой периодичности смены их в связи с затуплением могут встретиться следующие случаи расчета периодов стойкости:

1. Работа одним инструментом на одноинструментном специальном станке. Смена инструмента производится по достижении периода расчетной стойкости.

2. Наладка из нескольких одинаковых и тождественно работающих инструментов. Смена инструментов производится по достижении расчетной стойкости.

3. Наладка из нескольких различных или различно работающих инструментов. Смена инструментов производится индивидуально, независимо от других инструментов наладки, по достижении ими расчетной стойкости.

4. Наладка из нескольких различных или различно работающих инструментов. Одновременно сменяется вся наладка по достижении ею общей для всех инструментов расчетной стойкости.

5. Наладка из нескольких различных групп одинаковых и тождественно работающих инструментов. Смена инструментов производится группами по достижении каждой группой общего для нее периода расчетной стойкости.

6. Наладка из различных или различно работающих инструментов. Смена инструментов производится группами инструментов, имеющих примерно одинаковый календарный период времени работы на станке или одинаковое число циклов работы. Смена производится по истечении периода времени, близкого к расчетному календарному и установленному исходя из различных организационных и технических условий (через 0,5 смены, через 1,0 смены и т. д.) или после определенного числа циклов.

Последний случай является наиболее общим и типичным для агрегатных станков и автоматических линий, все остальные являются частными случаями.

При разработке алгоритма определения расчетного периода стойкости инструментов наладок агрегатных станков и автоматических линий этот случай принят нами в качестве основного.

Определение расчетной стойкости производится в следующей последовательности:

1. Для каждого инструмента определяется экономи-

ческий период стойкости с учетом того, что инструмент работает в наладке из различных инструментов:*

$$T_{\text{эк}} = \frac{(\mu - 1)(PE_{\text{п}} + \Pi_{\text{п}}E_{\text{п}} + S_{\text{п}})}{E_{\text{р}}} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{l=p} \sum_{i=1}^{i=q_j} \Lambda_{ij}}{\Lambda_{ij}} \quad (171)$$

в мин. рабочего хода.

2. Определяется календарное время работы инструмента между переточками:

$$T_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{эк}}}{K_{\text{загр}} \lambda_{\text{ц}}} \quad (172)$$

3. Все инструменты наладки разбиваются на группы по признаку кратности $T_{\text{кал}}$, периодам работы между регламентированными перерывами.

Для всех инструментов каждой группы принимается время работы $T_{\text{орг}}$, кратное времени работы между перерывами.

4. Для каждого инструмента группы определяется расчетный период стойкости:

$$T_{\text{расч}} = T_{\text{орг}} K_{\text{загр}} \lambda_{\text{ц}} \Lambda_{ij} \text{ в мин. резания.} \quad (173)$$

По величине $T_{\text{расч}}$ определяется свободный член b_1 .

5. Число циклов работы инструмента между переточками определяется по формуле:

$$n_{\text{ц}} = \frac{T_{\text{орг}} K_{\text{загр}}}{T_{\text{ц}}} \quad (174)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ДЛЯ МНОГОИНСТРУМЕНТНЫХ НАЛАДОК АГРЕГАТНЫХ СТАНКОВ И АВТОМАТИЧЕСКИХ СТАНОЧНЫХ ЛИНИЙ

В результате ряда преобразований различных функциональных зависимостей между элементами режима резания на агрегатном станке и автоматической линии и основными техническими ограничениями, определяющими для каждо-

* Все величины, упоминаемые в настоящей главе, имеют индекс ij , который по техническим причинам опущен. Индекс ij означает принадлежность величины i -му инструменту j -й силовой головки.

го из инструментов наладки возможные пределы изменений элементов режима резания методами, изложенными в главе II, получена *универсальная математическая модель* оптимальных режимов резания для агрегатных станков и автоматических линий любых типов, оснащенных как одноинструментными, так и многоинструментными силовыми головками с наладками из любого числа различных инструментов.

В развернутом виде математическая модель имеет следующий вид:

$i=1$	$(C) \left\{ \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} x_1 + y_v x_2 \leq b_1 \\ x_1 \geq b_4 \\ x_1 \leq b_5 \end{array} \right\} n \\ \left. \begin{array}{l} y_s x_2 \leq b_6 \\ x_2 \geq b_9 \end{array} \right\} S \\ \left. \begin{array}{l} x_1 + x_2 \geq b_3 \\ x_1 + x_2 \leq b_8 \\ x_1 + x_2 \geq b_7 \end{array} \right\} R \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} x_1 > 0; \\ x_2 > 0; \end{array}$	$j=p$
	$f_o = x_1 + x_2 \rightarrow \max$ $n_{\text{опт}} = e^{x_{1\text{опт}}}; \quad S_{\text{опт}} = \frac{e^{x_{2\text{опт}}}}{100};$ $P_x = C_x K_x t^{x_x} S_{\text{опт}}^{y_x} D^{z_x} H_B^{n_x} z^{u_x} B^{r_x};$ $M_{\text{кр}} = \frac{C_z}{K_{c_z}} K_z t^{x_z} S_{\text{опт}}^{y_z} D^{z_z} H_B^{n_z} z^{u_z} B^{r_z};$ $N_{\text{эф}} = \frac{M_{\text{кр}} n_{\text{опт}}}{975 \cdot 000};$ $P_{\text{под. ст}} = \sum_{i=1}^{i=q_j} P_x; \quad N_n = \frac{1}{\eta_{\text{ср}}} \sum_{i=1}^{i=q_j} N_{\text{эф}}.$	$i=q_j$
		$j=1$

Математическая модель представляет совокупность смешанной системы (C), линейной формы f_o и пяти уравнений и неравенств для вычисления P_x , $M_{\text{кр}}$, $N_{\text{эф}}$ для каждого инструмента и $P_{\text{под. ст}}$ и N_n для всей наладки.

Свободные члены имеют следующие значения:

Свободный член b_1 , характеризующий влияние на режим резания режущих возможностей инструмента, условий обработки и расчетной стойкости $T_{расч}$, равен:

$$b_1 = \ln \left(\frac{100^y C_v K_v K_{HB}^{n_v}}{t^{x_v} D^{z_v} H_B^{n_v} z^{u_v} B^{r_v}} \cdot \frac{318}{T_{расч}^m} \right). \quad (175)$$

Свободные члены b_4 и b_5 , характеризующие влияние на режим резания минимальной и максимальной допустимой скоростей резания, допустимых при обработке металла режущим инструментом, равны:

$$b_4 = \ln \left(-\frac{318 v_{min}}{D} \right); \quad b_5 = \ln \left(\frac{318 v_{max}}{D} \right). \quad (176)$$

Свободный член b_6 , характеризующий влияние на режим резания прочности и жесткости системы станок—изделие—инструмент и требований к чистоте обработки, равен:

$$b_6 = \ln (100^{y_s} \Phi). \quad (177)$$

В формуле для b_6 величина Φ представляет различные функции, характеризующие названные технические ограничения.

Свободный член b_9 , характеризующий влияние на режим резания минимальной допустимой подачи s_{min} для данного инструмента и вида обработки, равен:

$$b_9 = \ln (100 s_{min}). \quad (178)$$

Свободный член b_3 , характеризующий влияние на режим резания величины заданной производительности R , коэффициента загрузки станка $K_{загр}$, числа одновременно обрабатываемых деталей r_R , величины вспомогательного времени на обработку t_b и длины рабочего хода инструмента $L_{р.х}$, равен:

$$b_3 = \ln \left[\frac{100}{K_\Phi} \cdot \frac{L_{р.х}}{\left(\frac{60 K_{загр} r_R}{R} - t_b \right)} \right]. \quad (179)$$

Свободные члены b_7 и b_8 , характеризующие влияние на режим резания пределов возможных минутных подач силовой головки, равны:

$$b_7 = \ln (100 S_{M_{min}}); \quad b_8 = \ln (100 S_{M_{max}}). \quad (180)$$

Математическая модель универсальна и пригодна для любого типа агрегатного станка и автоматической линии:

при $i_j = q_j$ и $j = P$ она соответствует автоматической линии или многостороннему агрегатному станку, имеющему P головок по q_j инструментов в каждой;

при $i_j = 1$ и $j = P$ она соответствует малому агрегатному станку, оснащеному P одноинструментными силовыми головками малого размера;

при $i_j = q_j$ и $j = 1$ она соответствует многоинструментному агрегатному станку с одной силовой головкой и шпиндельной коробкой со q_j шпинделями;

при $i = 1$ и $j = 1$ она соответствует одноинструментному специальному станку.

При использовании приведенной выше математической модели в качестве основы для расчета оптимальных режимов резания на агрегатных станках и автоматических линиях решение задачи можно разделить на два этапа:

1) нахождение для каждого инструмента наладки оптимального числа оборотов и подачи в условиях заданных технических ограничений и

2) определение осевого усилия, крутящего момента и эффективной мощности для каждого инструмента и их сумм для всей наладки.

Наиболее ответственным и трудным этапом является первый, на котором из множества возможных решений выбирается оптимальное.

Для этой цели из множества возможных решений системы (С) выбирается такое, при котором линейная форма f_0 принимает наибольшее значение (себестоимость операции при этом имеет наименьшее значение), для чего применены основные идеи математического метода линейного программирования.

В зависимости от конструкции и условий работы проектируемого агрегатного станка или автоматической линии могут быть два принципиально различных случая расчета.

1. Станок или инструментальная наладка работают в синхронизированном потоке с жесткими связями между станками или станок оборудован шпиндельной коробкой с большим числом установленных в ней инструментов. В этом случае необходимо строго обеспечить заданную производительность и величину минутной подачи, общей для всех инструментов одной шпиндельной коробки.

(D) — точка оптимума по заданной производительности; (C) — точка оптимума по минимуму себестоимости; (H) — область возможных решений, определяемая технологически допустимыми скоростями резания; (S) — область возможных решений, определяемая технически допустимыми величинами подач; (R) — область возможных решений, определяемая величинами предельных минутных подач силовой головки; $afgoD$ — область возможных решений, определяемая величинами предельных минутных подач силовой головки, технологически допустимыми подачами и заданной производительностью; BCD — область возможных решений, определяемая всеми учтенными техническими ограничениями.

В первом случае для расчета, когда заданная производительность или минутная подача должна иметь только одно-единственное значение для всех инструментов наладки, неравенство

$$x_1 + \bar{x}_2 \geq b_3 \quad (181)$$

превращается в уравнение

$$x_1 + x_2 = b_3 \quad (182)$$

и точки, соответствующие всем возможным решениям системы (C), в рамках заданных технических ограничений, могут лежать только на отрезке BD прямой уравнения (182), заключенном в области возможных решений BCD .

Для каждого из инструментов наладки наиболее благоприятное решение будет соответствовать точке (D) пересечения, общей для всех инструментов прямой уравнения (182) и индивидуальной для каждого инструмента граничной прямой неравенства:

$$y_s x_2 \leq b_6. \quad (183)$$

На рис. 11 точке оптимума соответствует точка (D), а ее координаты x_{1R} и x_{2R} будут являться оптимальным решением системы (C) для данного случая по заданной производительности.

Во втором случае расчета, когда производительность или минутная подача для каждого инструмента могут отклоняться от заданных в большую сторону, в системе (C) сохраняется неравенство (181).

В этом случае (рис. 11) область возможных решений системы (C) будет представлять площадь внутри многоугольника* BCD .

Из бесчисленного множества точек внутри многоугольника BCD оптимальному решению системы (C), при котором себестоимость операции будет минимальной, всегда будет соответствовать точка C .

Последнее вытекает из того, что граничная прямая неравенства:

$$x_1 + y_v x_2 \leq b_1 \quad (184)$$

всегда наклонена к оси x_2 под углом $\rho \leq 45^\circ$, так как всегда показатель степени в формуле для определения скорости резания $y_v < 1$. Прямая же оптимизируемой линейной формы:

$$f_0 = x_1 + x_2 \rightarrow \max \quad (185)$$

всегда наклонена к оси x_2 под углом 45° .

* Многоугольник решений не обязательно должен быть треугольником, он может быть выпуклым многоугольником любой формы, отрезком прямой и, наконец, точкой.

Следовательно, прямая линейной формы (185) при перемещении ее параллельно самой себе в направлении от начала координат сойдет с отрезка BC всегда в точке C .

В этот момент линейная форма f_0 будет иметь наибольшее возможное значение, что соответствует наименьшей себестоимости операции или наибольшей производительности в условиях заданных технических ограничений.

Точка C может быть точкой пересечения прямой уравнения (184) с одной из граничных прямых неравенств:

$$\begin{aligned} y_5 x_2 &\leq b_6; \\ x_1 + x_2 &\leq b_8; \\ x_1 &\geq b_4. \end{aligned}$$

Из трех точек пересечения точкой оптимума будет являться точка, координаты которой удовлетворяют одновременно всем трем неравенствам: (183), (186), (187).

Координаты точки C являются оптимальным решением системы для второго случая расчета.

При нахождении оптимального решения очень часто могут встретиться различные случаи несовместности системы C .

Прямая уравнения (182) или граничная прямая неравенства (181) не лежит в полосе между граничными прямыми неравенств:

$$x_1 + x_2 \leq b_8; \quad (186)$$

$$x_1 + x_2 \geq b_7, \quad (186')$$

что соответствует случаю, когда заданная производительность не может быть достигнута при заданных пределах минутных подач силовой головки;

граничная прямая неравенства:

$$x_1 + y_v x_2 \leq b_1$$

проходит ниже области $abc D$ или отрезка ad , что соответствует случаю, когда условия резания и режущие возможности инструмента не соответствуют остальным техническим ограничениям;

граничная прямая неравенства проходит выше точки оптимума, что соответствует случаю, когда оптимальная скорость резания оказывается меньше минимальной ско-

рости резания, допустимой в этом случае обработки, и т. п.

Алгоритмы определения оптимальных режимов резания предусматривают проверку совместности системы (С) по различным признакам и приведение ее к совместному виду за счет уточнения и исправления исходных данных.

После нахождения оптимального решения системы (С) определяются для каждого инструмента наладки оптимальные число оборотов и подача на оборот, а по ним минутная подача S_M , затем P_x , $M_{кр}$, $N_{эф}$, $P_{под. ст}$, N_n .

В случае, если максимальные возможные подачи или скорости резания для разных инструментов наладки значительно различаются, предусматривается определение первой (S_{1M}) и второй (S_{2M}) рабочих подач силовой головки.

Подобным же методом решается задача в случае, когда инструменты станка или наладки работают независимо один от другого и заданная производительность может в небольших пределах изменяться для каждого инструмента.

Ниже приводятся алгоритмы определения оптимальных режимов резания на агрегатных станках и автоматических линиях инструментами, установленными в одной шпиндельной коробке. По образцу приводимых алгоритмов легко могут быть получены алгоритмы и для других условий работы.

АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА АГРЕГАТНЫХ СТАНКАХ И АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ ИНСТРУМЕНТАМИ, УСТАНОВЛЕННЫМИ В ОДНОЙ ШПИНДЕЛЬНОЙ КОРОБКЕ

Исходные данные, необходимые для определения оптимальных режимов резания, получаются на основе технического задания на проектирование агрегатного станка или автоматической линии, схемы инструментальной наладки и операционного чертежа детали (первичные данные) и из специальных таблиц констант, технических характеристик и нормативных данных (вторичные данные).

Эти таблицы могут быть введены в память машины, и тогда выборка вторичных данных из них происходит автоматически.

В ряде случаев удобнее находить эти данные по таблицам и заполнять «вручную» таблицу исходных данных (таблица 5).

Таблица 5

**Исходные данные для расчета оптимальных режимов резания
при многоинструментной обработке на агрегатных станках
и автоматических станочных линиях**

Наименование и шифр агрегатного станка или линии _____
Обрабатываемая деталь _____

Наименование сведений	Обозначение	Размерность	№ силовых головок							
			1	2	3		p			
			№ режущих инструментов							
			1	2	3	4	5	6		q _j
1	2	3	1	2	3	4	5	6		q _j
Длина резания	$L_{рез}$	мм								
Длина рабочего хода	$L_{р-х}$	мм								
Длина рабочего хода станка (головки)	$L_{гол}$	мм								
Время простоя станка для смены и подналадки инструмента	П	мин								
Стоимость износа и заточки инструмента за период стойкости	$S_{и}$	коп	Точение	Фрезерование	Обработка отверстий сверчевым инструментом	Нарезание резьбы				
Время на смену и подналадку инструмента	$\Pi_{п}$	мин								
Показатель относительной стойкости	μ	—								
Коэффициент загрузки	$K_{загр}$	—								
Сумма всех вспомогательных времен	$t_{в}$	мин								
Заданная производительность	R	шт/час								
Количество деталей, обрабатываемых в одной позиции	r_R	шт								
Стоимость станкомину-ты рабочего хода	E_p	коп/мин								
Отношение стоимости станкомину-ты вспомога-тельной работы к стои-мости станкомину-ты ра-бочего хода	$\kappa_{в}$	—								

1	2	3	1	2	3	4	5	6		p
Зарплата наладчика в минуту с начислениями	E_n	коп./мин								
Поправочный коэффициент в формуле скорости резания на сечение резца	K_1	—		1	1	1				
То же на главный угол в плане	K_2	—			1	1				
То же на вспомогательный угол в плане	K_3	—		1	1	1				
То же на радиус при вершине резца	K_4	—		1	1	1				
То же на материал режущей части резца	K_5	—								
То же на способ изготовления металла заготовки	K_6	—								
То же на состояние поверхности металла	K_7	—								
То же на форму передней грани	K_8	—		1	1	1				
То же на разницу диаметров при прорезке	K_9	—		1	1	1				
То же на диаметр отверстия при расточке	K_{10}	—		1	1	1				
То же на тип режущего инструмента	K_{11}	—								
То же на вид обработки	K_{12}	—								
То же на глубину сверления	K_{13}	—	1	1		1				
То же на способ и вид охлаждения	K_{14}	—								
Поправочный коэффициент в формуле окружного усилия резания на главный угол в плане	K_{15}	—		1	1	1				

1	2	3	1	2	3	4	5	6	...	p
То же на радиус при вершине резца	K_{16}	—		1	1	1				
То же на величину оп- тимального износа	K_{17}	—		1	1					
То же на тип режуще- го инструмента	K_{18}	—								
То же на твердость об- рабатываемого металла	K_{19}	—		1	1	1				
Поправочный коэффици- ент в формуле усилия подачи на главный угол в плане	K_{20}	—		1	1	1				
То же на тип режуще- го инструмента	K_{21}	—	1	1	1	1				
То же на величину оп- тимального износа	K_{22}	—		1	1	1				
$C_v'' = 100^{y_v} \quad 318 C_v$	C_v''	—								
Показатель степени в формуле скорости резания при глубине резания	x_v	—								
То же при подаче	y_v	—								
То же при диаметре об- работки или инструмента	z_v	—								
То же при твердости по Бринеллю	n_v	—								
То же при числе зубьев инструмента	u_v	—								
То же при ширине фре- зерования	r_v	—								
Показатель оптимальной скорости резания в форму- ле $v = C : T^m$	m	—								
Поправочный коэффици- ент к твердости по Бри- неллю	$K_{нБ}$	—	200	1	1	1				

1	2	3	1	2	3	4	5	6	...	p
Постоянная в формуле окружного усилия резания	C_z	—								
Показатель степени в формуле окружного усилия резания при глубине резания	x_z	—								
То же при подаче	y_z	—								
То же при диаметре обработки или инструмента	z_z	—								
То же при твердости по Бринеллю	n_z	—								
То же при числе зубьев инструмента	u_z	—								
То же при ширине фрезерования	r_z	—								
Постоянная в формуле усилия подачи	C_x	—				0				
▶ Показатель степени в формуле усилия подачи при глубине резания	x_x	—				0				
То же при подаче	y_x	—				0				
То же при диаметре обработки или инструмента	z_x	—				0				
То же при твердости по Бринеллю	n_x	—				0				
То же при числе зубьев инструмента	u_x	—				0				
То же при ширине фрезерования	r_x	—				0				
Глубина резания	t	мм				1				
Диаметр обработки или инструмента	D	мм								
Твердость заготовки по Бринеллю	H_B	кг/мм ²								
Максимальная допустимая скорость резания $\times 318$	v_{max}	м/мин								

1	2	3	1	2	3	4	5	6	...	p
Число зубьев инструмента	$\overline{z}$	—	1		1	1				
Ширина фрезерования	$\overline{B}$	мм	1		1	1				
Минимальная допустимая скорость резания $\times 318$	v'_{min}	м/мин								
Поправочный коэффициент при обработке отверстий	K_{23}	—	0	0	1	0				
Поправочный коэффициент при резбонарезании	K_{24}	—	0	0	0	1				
То же при черновом фрезеровании	K_{25}	—	0		0	0				
То же при чистовом фрезеровании	K_{26}	—	0		0	0				
То же при точении	K_s	—	1	0	0	0				
То же при точении	$K_{ж}$	—		0	0	0				
Допустимый прогиб резца	f_p	мм		0	0	0				
То же заготовки	$f_{заг}$	мм		0	0	0				
Модуль упругости материала державки	$E_{держ}$	кг/мм ²		0	0	0				
То же заготовки	$E_{заг}$	кг/мм ²		0	0	0				
Диаметр заготовки	$\overline{D_{заг}}$	мм		0	0	0				
Длина заготовки	$\overline{L_{заг}}$	мм		0	0	0				
Ширина сечения державки резца	$\overline{b}$	мм		0	0	0				
Высота сечения державки резца	$\overline{h}$	мм		0	0	0				
Вылет резца из державки	$\overline{l_p}$	мм		0	0	0				
Постоянная в формуле подачи в зависимости от частоты обработки при точении	$C_{п}$	—		0	0	0				

1	2	3	1	2	3	4	5	6	...	p
Показатель степени при $H_{ск}$	n_H	—		0	0	0				
То же при глубине резания	x_H	—		0	0	0				
То же при радиусе закругления вершины резца	u_H	—		0	0	0				
То же при углах в плане	z_H	—		0	0	0				
Средняя квадратическая высота неровностей обрабатываемой поверхности	$[H_{ск}]$	мк			0	0				
Главный угол резца в плане	$[\varphi]$	град			0	0				
Вспомогательный угол резца в плане	$[\varphi_1]$	град		0	0	0				
Радиус закругления вершины резца в плане	$[r]$	мм		0	0	0				
Постоянная в формуле подачи при обработке отверстий	C_s	—	0	0		0				
Показатель степени при диаметре инструмента	p	—	0	0		0				
Постоянная в формуле подачи при черновом фрезеровании	C_{ϕ}	—	0		0	0				
Показатель степени при глубине резания	x_{ϕ}	—	0		0	0				
То же при ширине фрезерования	r_{ϕ}	—	0		0	0				
То же при диаметре фрезы	z_{ϕ}	—	0		0	0				
Постоянная в формуле подачи при чистовом фрезеровании	C_{ψ}	—	0		0	0				
Показатель степени при $H_{ск}$	n_{ψ}	—	0		0	0				

1	2	3	1	2	3	4	5	6	...	p
То же при глубине резания	x_q	—	0		0	0				
То же при диаметре фрезы	z_q	—	0		0	0				
Шаг нарезаемой резьбы	$[S_p]$	мм	0	0	0					
Минимальная минутная подача силовой головки $\times 100$	S'_{min}	мм/мин								
Максимальная минутная подача силовой головки $\times 100$	S'_{max}	мм/мин								
Минимальная технологически допустимая подача для данного инструмента $\times 100$	S'_{min}	мм/об (мм/зуб)								
Поправочный коэффициент в формуле для b_3	K'_ϕ	—	100		100	100				
Средний к. п. д. передач от двигателя к шпинделям	$\eta_{ср}$	—								
Коэффициент загрузки станка $\times 60$	$K'_{загр}$	—								
Наибольшая минутная подача гаммы головок	$S'_{табл max}$	—								
То же наименьшая	$S'_{табл min}$	—								

При разномножении таблицы 5 целесообразно изготовить несколько вариантов ее для агрегатных станков и линий, не содержащих токарных и фрезерных операций, для станков и линий, содержащих такие операции, и т. п., заполнив заранее в этих формах места сведений, не нужных для расчета режимов тех операций, для которых составлен данный вариант таблицы 5.

В приводимой ниже в качестве примера таблице исходных данных показаны правила предварительного заполнения мест для данных, не участвующих в данной операции:

в столбце для инструмента № 1 — для точения всех видов;

в столбце для инструмента № 2 — для фрезерования всех видов;

в столбце для инструмента № 3 — для сверления, рас-
сверливания, цекования, зенкерования и развертывания;

в столбце для инструмента № 4 — для нарезания резьбы.

Обозначения первичных исходных данных взяты в таблице в рамки.

При группировании задач по сходным признакам число переменных исходных данных значительно сокращается.

По аналогии с одноинструментной обработкой число исходных данных может быть резко сокращено за счет группирования заданий по видам обработки, по режущим инструментам разных типов, по обрабатываемым материалам и т. п., когда большое число общих для группы данных будет вводиться в машину один раз вместе с программой. В этих случаях могут быть применены и значительно сокращенные частные программы, составленные на основе приводимых ниже алгоритмов.

Алгоритм № 1. Определение расчетного экономического периода стойкости режущих инструментов многоинструментных наладок агрегатных станков и автоматических станочных линий.

Исходные данные для расчета

Для каждого инструмента наладки должны быть заданы:
длина резания — $L_{рез}$ в мм;

длина рабочего хода — $L_{р.х}$ в мм;

время простоя станка или линии для смены и подналадки инструмента — P в мин;

время на смену и подналадку инструмента — $P_{и}$ в мин;

стоимость износа и заточки инструмента за период стойкости — $S_{и}$ в коп.;

показатель относительной стойкости — μ .

Для всей наладки должны быть заданы:

коэффициент загрузки станка или линии — $K_{загр}$;

сумма всех вспомогательных времени — $t_{в}$;

заданная производительность — R шт/час;

количество деталей, обрабатываемых одновременно в одной позиции — r_R ;

стоимость станкоминутой времени рабочего хода — E_p коп/мин;

отношение стоимости станкоминуты вспомогательной работы к стоимости станкоминуты рабочего хода — κ_v ;
 зарплата наладчика в минуту с начислениями — E_n коп/мин;
 число всех инструментов в наладке — q .

Определить коэффициент загрузки инструментов, наладки.

$$\tau_{\text{загр}} = K_{\text{загр}} - \frac{t_v R}{60 r_R}.$$

Определить коэффициенты резания для каждого инструмента наладки:

$$\Lambda = \frac{L_{\text{рез}}}{L_{p \cdot x}}.$$

Определить сумму расходов на эксплуатацию в связи с затуплением за период стойкости для каждого инструмента наладки в станкоминутах времени рабочего хода:

$$\mathcal{E} = P \kappa_v + \frac{P_n E_n + S_n}{E_p}.$$

Определить календарное экономическое время работы каждого инструмента наладки:

$$T_{\text{эк. кал}} = \frac{\mu - 1}{\tau_{\text{загр}}} \cdot \frac{\sum_{i=q_l}^{i=q_l} \Lambda_{ij}}{\Lambda_{ij}} \cdot \mathcal{E}.$$

Разбить все инструменты наладки на группы и определить период работы между переточками для каждой группы.

Если

$0 < T_{\text{эк. кал}} \leq 60$, то отнести инструмент к 1-й группе.

Принять $T_{\text{орг}_1} = 60$.

$60 < T_{\text{эк. кал}} \leq 120$, » » » ко 2-й группе.

Принять $T_{\text{орг}_2} = 120$.

$120 < T_{\text{эк. кал}} \leq 210$, » » » к 3-й группе.

Принять $T_{\text{орг}_3} = 210$.

$210 < T_{\text{эк. кал}} \leq 420$, » » » к 4-й группе.

Принять $T_{\text{орг}_4} = 420$.

$420 < T_{\text{эк. кал}} \leq 630$, то отнести инструмент к 5-й группе.
 Принять $T_{\text{орг}_5} = 630$.
 $630 < T_{\text{эк. кал}} \leq 840$, » » » к 6-й группе.
 Принять $T_{\text{орг}_6} = 840$.
 $840 < T_{\text{эк. кал}}$ » » » к 7-й группе.
 Принять $T_{\text{орг}_7} = 1260$.

Определить расчетную стойкость для каждого инструмента наладки в минутах резания:

$$T_{\text{расч}} = T_{\text{орг}_k} \tau_{\text{загр}} \Lambda.$$

Машина выдает на печать $T_{\text{расч}}$ и $T_{\text{орг}_k}$, отсылает в ЗУ и переходит к реализации алгоритма № 2.

Примечание. k — номер той группы, в которую вошел инструмент ($k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$); $T_{\text{орг}_k}$ — период работы между переточками каждого инструмента указывает на периодичность его смены.

Алгоритм № 2. Определение свободных членов b

Исходные данные для расчета

$$\boxed{b_1} — K_1, K_2, \dots, K_{14}, C_v, x_v, y_v, z_v, n_v, u_v, r_v, m, K_{\text{ИБ}},$$

$$t, D, H_B, z, B, T_{\text{расч}};$$

$$\boxed{b_3} — K'_\phi, K'_{\text{загр}}, L_{\text{р.х}}, r_R, R, t_B; \quad \boxed{b_4} — v'_{\text{min}}, D;$$

$$\boxed{b_5} — v'_{\text{max}}, D; \quad \boxed{b_6} — K_{15}, K_{16}, \dots, K_{19}, K_s, f_p, E_{\text{держ}}, \\ C_z, t, x_z, y_z, H_B, n_z, b, h, l_p, K_{\text{ж}}, f_{\text{заг}}, E_{\text{заг}}, D_{\text{заг}}, L_{\text{заг}}, \\ C_{\text{н}}, H_{\text{ск}}, n_{\text{н}}, x_{\text{н}}, r, U_{\text{н}}, \varphi, \varphi_1, Z_{\text{н}}, C_s, D, p, K_{25}, C_\phi, x_\phi;$$

$$\boxed{b_7} — S'_{M_{\text{min}}}; \quad \boxed{b_8} — S'_{M_{\text{max}}}; \quad \boxed{b_9} — S'_{\text{min}}.$$

Примечания: 1. Все исходные данные вводятся при расчете для каждого инструмента отдельно с индексом i , где $i = 1, 2, \dots, q$ (q — число всех инструментов в наладке). 2. Если наладка принадлежит нескольким головкам, то около i становится индекс головки j , например b_{1ij} , где $j = 1, 2, \dots, P$ (P — число силовых головок на станке).

$$A_1 = \frac{t^{x_v} D^{z_v} \left(\frac{H_B}{K_{H_B}} \right)^{n_v} z^U_v B^{r_v} T_{расч}^m}{C_v''};$$

$$K_v = \prod_{l=1}^{l=14} K_l; \quad \overline{b_1} = \ln \left(\frac{K_v}{A_1} \right).$$

$$b_4 = \ln \left(\frac{v'_{min}}{D} \right); \quad \overline{b_5} = \ln \left(\frac{v'_{max}}{D} \right).$$

$$K_z = \prod_{l=15}^{l=19} K_l;$$

$$A_4 = K_s \frac{f_p E_{держ}}{4 C_z K_z t^{x_z} H_{Bz}^n}; \quad \alpha = A_4 \frac{b h^3}{l_p^3};$$

$$A_5 = K_{ж} \frac{f_{заг} E_{заг} D_{заг}^4}{C_z k_z t^{x_z} H_{Bz}^n}; \quad \beta = \frac{A_5}{L_{заг}^3};$$

$$A_6 = C_n \frac{(4 H_{ск})^{n_n}}{t^{x_n}}; \quad \gamma = A_6 \frac{r^U_n}{(\varphi \varphi_1)^{L_n}};$$

$$\delta = K_{23} C_s D^p;$$

$$A_7 = K_{25} \frac{C_\Phi}{t^{x_\Phi} B^{r_\Phi}}; \quad \varepsilon = A_7 D^{z_r};$$

$$A_8 = K_{26} \frac{C_r (4 H_{ск})^{n_r}}{z t^{x_r}}; \quad \xi = A_8 D^{z_p};$$

$$\Phi = \min (\alpha \neq 0; \beta \neq 0; \gamma \neq 0; \delta \neq 0; \varepsilon \neq 0; \xi \neq 0).$$

Если

$$\Phi = \alpha, \quad \text{то} \quad y_s = y_z;$$

$$\Phi = \beta, \quad \text{то} \quad y_s = y_z;$$

$$\Phi = \gamma, \quad \text{то} \quad y_s = 1;$$

$$\Phi = \delta, \quad \text{то} \quad y_s = 1;$$

$$\Phi = \varepsilon, \quad \text{то} \quad y_s = 1;$$

$$\Phi = \xi, \quad \text{то} \quad y_s = 1;$$

$$b_6 = \ln (100^{y_s} \Phi).$$

$$\overline{b_9} = \ln(S'_{min}); \quad \overline{b_7} = \ln(S'_{Mmin}); \quad \overline{b_8} = \ln(S'_{Mmax});$$

$$A_3 = K'_\Phi L_{p \cdot x}; \quad b_3 = \ln \left(\frac{K'_{загр} r_R}{R} - t_b \right).$$

Если $\frac{K'_{загр} r_R}{R} \leq t_b$, то останов машины с выдачей признака.

Машина отправляет в ЗУ значения $b_1, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9$ и выдает их на печать.

Для всех инструментов наладки проверить совместность группы R (рис. 10). Если $b_3 \leq b_8$ и $b_3 \geq b_7$, то группа R совместна.

Перейти к вычислению координат точки (1).

Если $b_3 > b_8$, то уточнить значения b_8 и S_{Mmax} .

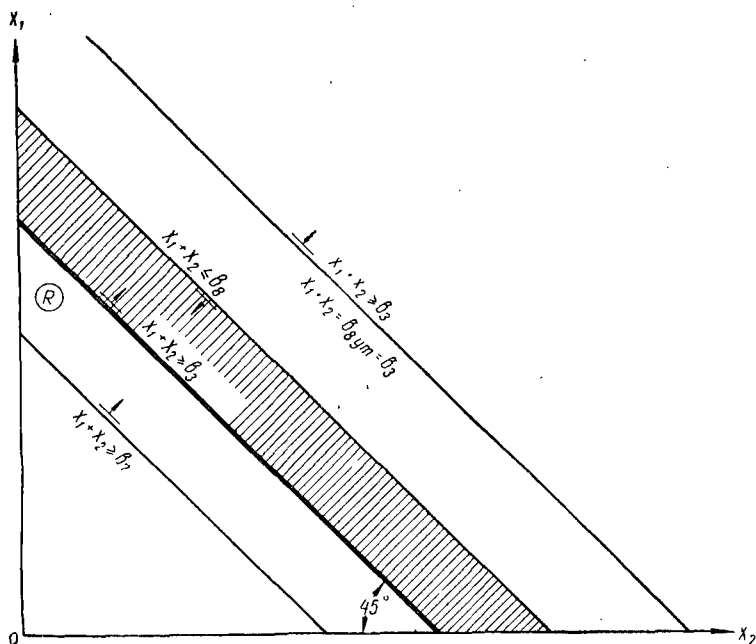


Рис. 12. Проверка совместности группы R системы (С).

$$b_{8\text{ут}} = b_3 \cdot S_{M\text{maxут}} = \frac{l^{b_{8\text{ут}}}}{100}.$$

Если

$$S_{M\text{maxут}} \ll S_{M\text{табл. max}},$$

то принять

$$S_{M\text{max}} = S_{M\text{maxут}}$$

(что соответствует замене силовой головки другой с большим верхним пределом минутных подач).

Если

$$S_{M\text{maxут}} > S_{M\text{табл. max}},$$

то принять

$$S_{M\text{maxут}} = S_{M\text{табл. max}}.$$

Уточнить величины b_8 , b_3 , R , $K_{\text{загр}}$:

$$b_{8\text{ут}} = b_{3\text{ут}} = \ln(100 S_{M\text{maxут}});$$

$$R_{\text{ут}} = \frac{K'_{\text{загр}} r_R e^{b_{8\text{ут}}}}{A_3 + t_b e^{b_{8\text{ут}}}};$$

$$K_{\text{загр ут}} = K_{\text{загр}} \frac{R}{R_{\text{ут}}}.$$

Отослать уточненные значения b_8 , b_3 , $K_{\text{загр}}$, R в ЗУ на места первоначальных значений соответствующих величин.

Если $b_3 < b_7$, то уточнить значения b_7 и $S_{M\text{min}}$:

$$b_{7\text{ут}} = b_3; S_{M\text{minут}} = \frac{l^{b_{7\text{ут}}}}{100}.$$

Если $S_{M\text{minут}} \geq S_{M\text{табл. min}}$,

то принять

$$S_{M\text{min}} = S_{M\text{minут}}.$$

Если $S_{M\text{minут}} < S_{M\text{табл. min}}$,

то принять

$$S_{M\text{minут}} = S_{M\text{табл. min}}.$$

Уточнить величины b_7 , b_3 , R , $K_{\text{загр}}$:

$$b_{7\text{ут}} = b_{3\text{ут}} = \ln(100 S_{\text{ММ}} m_{\text{ут}});$$

$$R_{\text{ут}} = \frac{K'_{\text{загр}} \cdot r_R l^{b_{3\text{ут}}}}{A_3 + t_b l^{b_{3\text{ут}}}},$$

$$K_{\text{загр}_{\text{ут}}} = K_{\text{загр}} \frac{R}{R_{\text{ут}}}.$$

Отослать уточненные значения b_7 , b_3 , R , $K_{\text{загр}}$ в ЗУ на места первоначальных значений соответствующих величин.

Перейти к проверке условия $b_3 \leq b_8$ и $b_3 \geq b_7$.

Алгоритм № 3. Определение оптимального решения системы (С)

Исходные данные для расчета

$$b_1, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, y_v, y_s.$$

Вычислить координаты точки (1) (рис. 13):

$$x_1^{(1)} = b_3 - b_6; \quad x_2^{(1)} = b_6.$$

Если $x_1^{(1)} \geq b_4$ и $x_1^{(1)} \leq b_5$,

то принять

$$x_{1\text{опт}} = x_1^{(1)}; \quad x_{2\text{опт}} = x_2^{(1)}.$$

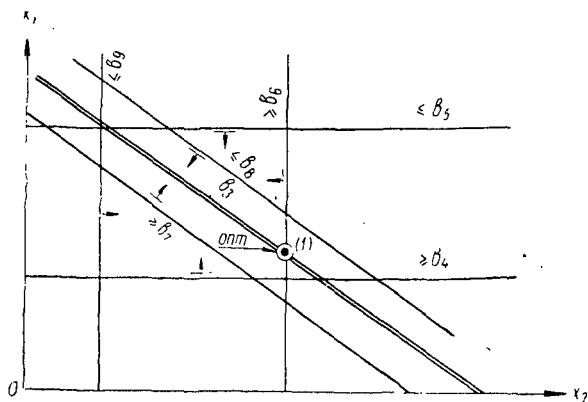


Рис. 13. Определение оптимального решения системы (С) — 1-й случай.

Перейти к проверке соответствия решения неравенству $x_1 + y_v x_2 \leq b_1$.

Если $x_1^{(1)} < b_4$, то вычислить координаты точки (2) (рис. 14):

$$x_1^{(1)} = b_4; \quad x_2^{(2)} = b_3 - b_4.$$

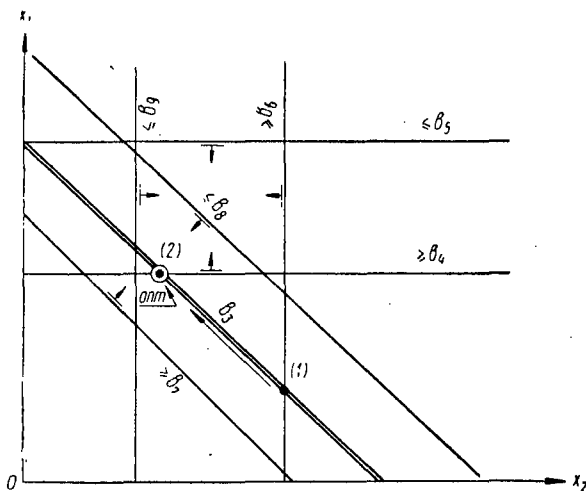


Рис. 14. Определение оптимального решения системы (С) — 2-й случай.

Если

$$x_2^{(2)} \geq b_9,$$

то принять

$$x_{1\text{опт}} = x_1^{(2)}; \quad x_{2\text{опт}} = x_2^{(2)}.$$

Перейти к проверке соответствия решения неравенству $x_1 + y_v x_2 \leq b_1$.

Если

$$x_2^{(2)} < b_9,$$

то принять (рис. 15)

$$x_{1\text{опт}} = b_4; \quad x_{2\text{опт}} = b_9.$$

Уточнить величину b_3 :

$$b_3^{(3)} = b_4 + b_9.$$

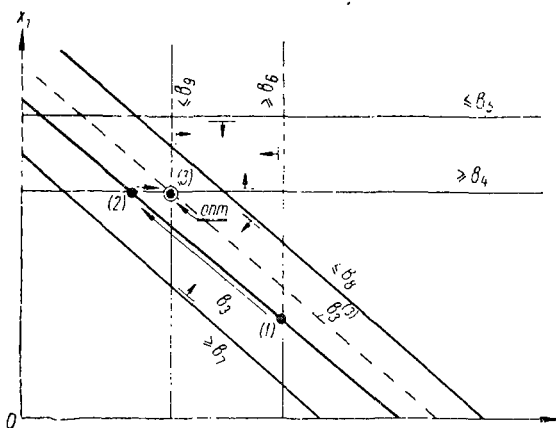


Рис. 15. Определение оптимального решения системы (C) — 3-й случай.

Если $b_3^{(3)} \leq b_8$, то определить величину 1-й рабочей подачи:

$$S_{1M} = \frac{e^{b_3^{(3)}}}{100}.$$

Если $b_3^{(3)} > b_8$, то уточнить b_8 и S_{Mmax} .*

$$b_{8ут} = b_3^{(3)}; S_{Mmaxут} = \frac{e^{b_{8ут}}}{100}.$$

Если

$$S_{Mmaxут} \leq S_{Mтабл. max},$$

то принять

$$S_{Mmax} = S_{Mmaxут}.$$

Отослать $b_{8ут}$ в ЗУ на место b_8 .

* Для ЭВМ «Урал-1» останов машины с выдачей признака.

Перейти к проверке соответствия решения неравенству $x_1 + y_v x_2 \leq b_1$.
Если

$$S_{M_{\max_{\text{ут}}}} > S_{M_{\text{табл. max}}},$$

то останов машины с выдачей признака.

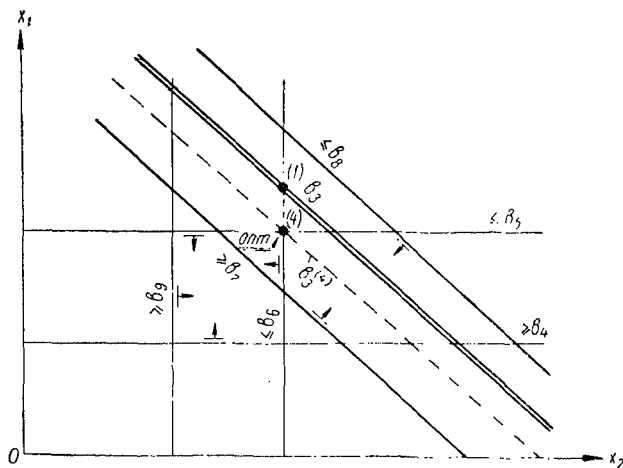


Рис. 16. Определение оптимального решения системы (С) — 4-й случай.

Если

$$x_1^{(1)} > b_5,$$

то принять

$$x_{1_{\text{опт}}} = b_5; \quad x_{2_{\text{опт}}} = b_6.$$

Определить величину $b_3^{(4)}$:

$$b_3^{(4)} = b_5 + b_6.$$

Если $b_3^{(4)} \geq b_7$, то определить величину 2-й рабочей подачи:

$$S_{2M} = \frac{e b_3^{(4)}}{100}.$$

Если $b_3^{(4)} < b_7$, то уточнить b_7 и $S_{M_{\min}}$:

$$b_{7_{\text{ут}}} = b_3^{(4)}; \quad S_{M_{\min_{\text{ут}}}} = \frac{e b_{7_{\text{ут}}}}{100}.$$

Если $S_{M_{\min_{\text{ут}}}} \geq S_{M_{\text{табл}_{\min}}}$, то отослать $b_{7_{\text{ут}}}$ в ЗУ на место b_7 .

Перейти к проверке соответствия решения неравенству $x_1 + y_v x_2 \leq b_1$.

Если $S_{M_{\min_{\text{ут}}}} < S_{M_{\text{табл}_{\min}}}$, то останов машины с выдачей признака.

Проверить соответствие оптимального решения неравенству

$$x_1 + y_v x_2 \leq b_1.$$

Если $x_{1_{\text{опт}}} + y_v x_{2_{\text{опт}}} \leq b_1$, то никаких уточнений не требуется.

Если $x_{1_{\text{опт}}} + y_v x_{2_{\text{опт}}} > b_1$, то уточнить b_1 :

$$b_{1_{\text{ут}}} = x_{1_{\text{опт}}} + y_v x_{2_{\text{опт}}};$$

$$K_{v_{\text{ут}}} = A_1 e^{b_{1_{\text{ут}}}}; \quad A_{1_{\text{ут}}} = \frac{K_v}{e^{b_{1_{\text{ут}}}}};$$

$$T_{\text{расч}_{\text{ут}}} = \frac{C_v A_{1_{\text{ут}}}}{t^{x_v} D^{z_v} \left(\frac{H_B}{K_{H_B}} \right)^{n_v} z^{u_v} B^{r_v}}; \quad T_{\text{орг}_{\text{ут}}} = \frac{T_{\text{расч}_{\text{ут}}}}{\tau_{\text{загр}} \Delta}.$$

Перейти к реализации алгоритма № 4.

Алгоритм № 4. Определение элементов оптимального режима резания

Исходные данные для расчета

$$x_{1_{\text{опт}}}, x_{2_{\text{опт}}}, b_3, b_3^{(3)}, b_3^{(4)}.$$

Если для всех инструментов наладки $b_3^{(3)} = 0$ и $b_3^{(4)} = 0$; ($i = 1, 2, \dots, q_j$), то принять для всей наладки

$$S_M = \frac{e^{b_3}}{100}.$$

Выдать на печать признак 0-й подачи.

Для каждого инструмента вычислить

$$n_{\text{опт}} = e^{x_{1_{\text{опт}}}}; \quad S_{\text{опт}} = \frac{e^{x_{2_{\text{опт}}}}}{100}.$$

Перейти к вычислению P_x , $M_{\text{кр}}$, $N_{\text{эф}}$ для каждого инструмента наладки (см. математическую модель).

Если для группы инструментов наладки

$$b_{3i}^{(3)} \neq 0, \text{ но } b_{3i}^{(4)} = 0; (i = 1, 2, \dots, q_j),$$

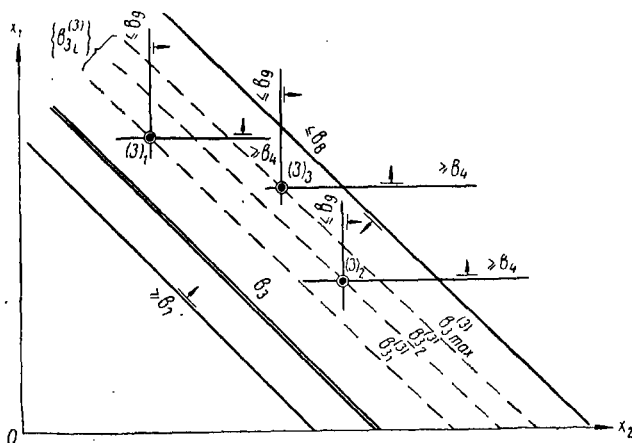


Рис. 17. Определение оптимального решения для группы инструментов, если $b_{3i}^{(3)} \neq 0$.

то определить $b_{3_{max}}^{(3)}$ (рис. 17):

$$b_{3_{max}}^{(3)} = \max \{ b_{3i}^{(3)} \neq 0 \}; (i = 1, 2, \dots, q_j).$$

Принять для группы инструментов, у которых $b_{3i}^{(3)} \neq 0$, 1-ю рабочую минутную подачу

$$S_{1M} = \frac{e^{b_{3_{max}}^{(3)}}}{100}.$$

Для всех остальных инструментов наладки принять 2-ю рабочую минутную подачу

$$S_{2M} = \frac{e^{b_3}}{100}.$$

При этом

$$S_{1M} > S_{2M}.$$

Уточнить время цикла станка (рис. 18):

$$L_1 = \max \{ L_{p \cdot x} \}_{b_{3i}^{(3)} \neq 0}; L_2 = L_{\text{гол}} - L_1;$$

$$T_{ц_{ут}} = \frac{L_1}{S_{1M}} + \frac{L_2}{S_{2M}} + t_n;$$

$$R_{ут} = \frac{60 K_{загр} r_R}{T_{ц_{ут}}}; \quad K_{загр_{ут}} = K_{загр} \frac{R}{R_{ут}}.$$

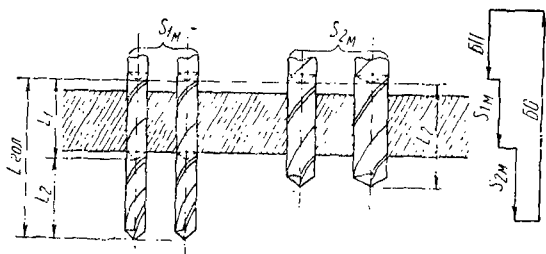


Рис. 18. Схема для определения длин ходов с 1-й и 2-й рабочими подачами ($b_3^{(3)} \neq 0$).

Принять $K_{загр} = K_{загр_{ут}}$ (величина R остается при этом неизменной).

Определить числа оборотов и подачи на оборот для группы инструментов, работающих с 1-й рабочей подачей:

$$n_{опт} = e^{b_4}; \quad s_{опт} = \frac{e^{b_{3_{max}}^{(3)}} - b_4}{100}$$

с выдачей на печать признака 1-й рабочей подачи.

Определить числа оборотов и подачи на оборот для инструментов, работающих со 2-й рабочей подачей:

$$n_{опт} = e^{x_{1опт}}; \quad s_{опт} = \frac{e^{x_{2опт}}}{100}$$

с выдачей на печать признака 2-й рабочей подачи.

Перейти к вычислению для каждого инструмента P_x , $M_{кр}$, $N_{эф}$.

Если для группы инструментов наладки (рис. 19)

$$b_{3_i}^{(3)} = 0, \text{ но } b_{3_i}^{(4)} \neq 0; \quad (i = 1, 2, \dots, q_j),$$

то определить $b_{3_{min}}^{(4)}$:

$$b_{3_{min}}^{(4)} = \min \{ b_{3_i}^{(4)} \neq 0 \} \quad (i = 1, 2, \dots, q_j).$$

Принять для группы инструментов, у которых $b_3^{(4)} \neq 0$, 2-ю рабочую минутную подачу

$$S_{2M} = \frac{e^{b_{3min}^{(4)}}}{100}.$$

Для всех остальных инструментов наладки принять 1-ю рабочую минутную подачу

$$S_{1M} = \frac{e^{b_s}}{100}.$$

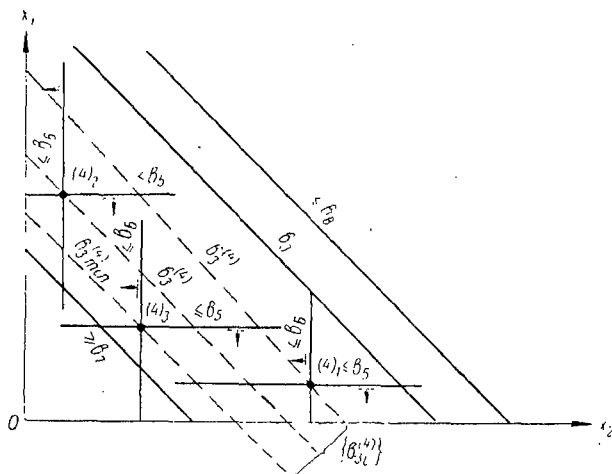


Рис. 19. Определение оптимального решения для группы инструментов, если $b_3^{(4)} \neq 0$.

При этом $S_{1M} > S_{2M}$.

Уточнить время цикла станка (рис. 20):

$$L_2 = \max \{L_{p.x}\}_{b_3^{(4)} \neq 0}; \quad L_1 = L_{\text{гол}} - L_2;$$

$$T_{\text{цут}} = \frac{L_1}{S_{1M}} + \frac{L_2}{S_{2M}} + t_{\text{в}};$$

$$R_{\text{ут}} = \frac{60 K_{\text{загр}} r_R}{T_{\text{цут}}}; \quad K_{\text{загрут}} = K_{\text{загр}} \frac{R}{R_{\text{ут}}}.$$

Если $K_{\text{загрут}} < 0,95$, то принять $K_{\text{загр}} = K_{\text{загрут}}$ (величина R остается при этом неизменной).

Если $K_{\text{загрут}} \geq 0,95$, то принять $K_{\text{загр}} = 0,95$.

Вычислить

$$R_{\text{ут}} = \frac{60 \cdot 0,95 \cdot r_R}{T_{\text{цут}}}$$

Определить числа оборотов и подачи на оборот для группы инструментов, работающих с 1-й рабочей подачей:

$$n_{\text{опт}} = e^{x_{1\text{опт}}}; \quad S_{\text{опт}} = \frac{e^{x_{2\text{опт}}}}{100}$$

с выдачей на печать признака 1-й рабочей подачи.

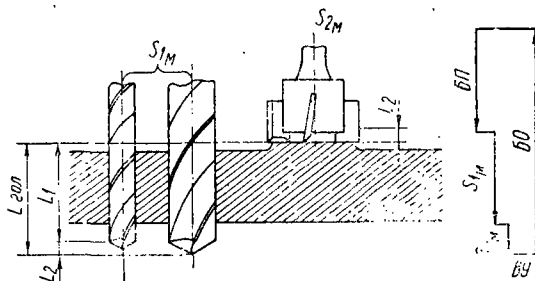


Рис. 20. Схема для определения длин с 1-й и 2-й рабочими подачами ($b_3^{(4)} \neq 0$).

Определить числа оборотов и подачи на оборот для группы инструментов, работающих со 2-й рабочей подачей:

$$n_{\text{опт}} = e^{b_{3\min}^{(4)} - b_3}; \quad S_{\text{опт}} = \frac{e^{b_3}}{100}$$

с выдачей на печать признака 2-й рабочей подачи.

Перейти к вычислению для каждого инструмента P_x , $M_{\text{кр}}$, $N_{\text{эф}}$.

Если среди инструментов наладки имеются инструменты, для которых $b_{3i}^{(3)} \neq 0$ и инструменты, для которых $b_{3i}^{(4)} \neq 0$; ($i = 1, 2, \dots, q_j$), то определить $b_{3\max}^{(3)}$ и $b_{3\min}^{(4)}$:

$$b_{3\max}^{(3)} = \max \{ b_{3i}^{(3)} \neq 0 \} \quad (i = 1, 2, \dots, q_j);$$

$$b_{3\min}^{(4)} = \min \{ b_{3i}^{(4)} \neq 0 \} \quad (i = 1, 2, \dots, q_j);$$

Если $\frac{b_{3max}^{(3)}}{b_3} \leq 1,1$, то принять

$$S_{1M} = \frac{e^{b_3}}{100}$$

и продолжить решение по настоящему алгоритму от знака $\downarrow 1$ до знака $\uparrow 1$.

Если $\frac{b_3}{b_{3min}^{(4)}} \leq 1,1$,

то принять $S_{2M} = \frac{e^{b_3}}{100}$ и продолжить решение по настоящему алгоритму от знака $\downarrow 2$ до знака $\uparrow 2$.

Если

$$\frac{b_{3max}^{(3)}}{b_3} \leq 1,1 \text{ и } \frac{b_3}{b_{3min}^{(4)}} \leq 1,1,$$

то принять

$$S_M = \frac{e^{b_3}}{100}.$$

Выдать на печать признак 0-й группы.

Для каждого инструмента вычислить

$$n_{\text{опт}} = e^{x_{\text{опт}}}; \quad S_{\text{опт}} = \frac{e^{x_{\text{опт}}}}{100}.$$

Перейти к вычислению для каждого инструмента P_x , $M_{\text{кр}}$, $N_{\text{эф}}$.

Если $\frac{b_{3max}^{(3)}}{b_3} > 1,1$ и $\frac{b_3}{b_{3min}^{(4)}} > 1,1$, то останов машины

с выдачей признака.

Вычислить

$$N_n = \frac{1}{\tau_{\text{ср}}} \sum_{i=1}^{i=q_j} N_{\text{эф}i}; \quad P_{\text{под.ст}} = \sum_{i=1}^{i=q_j} P_{xi}.$$

Выдать на печать N_n ; $P_{\text{под.ст}}$; S_M ; S_{1M} ; S_{2M} ; L_1 ; L_2 ;

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{\text{опт}ij}, S_{\text{опт}ij} \\ P_{xi}, M_{\text{кр}ij}, N_{\text{эф}ij} \end{array} \right\} \begin{array}{l} (j = 1, 2, \dots, p); \\ (i = 1, 2, \dots, q_j); \end{array} \quad R_{\text{ут}}, K_{\text{загр.ут}}.$$

На основании настоящих алгоритмов могут быть разработаны рабочие программы для универсальных цифровых электронно-вычислительных машин любого типа*.

Рекомендуется составлять специализированные рабочие программы, группируя задачи по ряду сходных признаков (инструменты, обрабатываемый материал, виды обработки и т. п.).

Режим резания для резьбонарезных инструментов определяется по алгоритму № 16, приведенному в главе II. Рабочие программы предусматривают так же согласование оптимальных режимов резания со ступенями чисел оборотов и подач станка и вычисление штучной нормы времени на переход.

* Для ЭВМ «Урал-1» рабочая программа разработана в ИМАШ АН БССР Л. Б. Радцевичем.

Глава IV

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВНЕДРЕНИЮ АВТОМАТИЗАЦИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА

Исходные данные, необходимые для определения оптимальных режимов резания, получаются на основе технологической карты или чертежа обрабатываемой детали, а при определении режимов для агрегатных станков или автоматических линий — на основе схемы инструментальной наладки и операционного чертежа детали. Эти данные составляют группу так называемых первичных исходных данных.

На основе первичных данных, которые являются как расчетными величинами, так и входами в специальные таблицы констант, технических характеристик и нормативных данных, вручную или автоматически определяются вторичные исходные данные для расчета.

Таблицы констант могут быть введены в память машины, и тогда выборка вторичных данных из них производится автоматически.

Однако в существующих конструкциях цифровых электронно-вычислительных машин эта операция связана с переводом групп данных из внешней памяти машины в оперативную, что отнимает много времени, значительно усложняет рабочие программы и может служить источником ошибок.

Поэтому на первом этапе внедрения автоматизации определения оптимальных режимов резания не следует стре-

миться к полной автоматизации всего процесса, а целесообразнее выборку вторичных исходных данных из таблиц производить вручную.

Как первичные, так и вторичные исходные данные для расчета вносятся в специальный бланк-задание для расчета оптимальных режимов резания. Формы этих заданий приведены в главах II и III.

Эти формы являются универсальными, приспособленными для универсальных алгоритмов и рабочих программ, т. е. пригодны для всех основных видов обработки резанием: точения, сверления, рассверливания, зенкерования и развертывания, и поэтому включают все исходные данные, встречающиеся при этих видах обработки, но в связи с этим они громоздки и неудобны для пользования.

В этих формах не нужно заполнять все данные для каждого вида обработки. Ряд данных, являющихся постоянными для каждого вида обработки, может быть заранее внесен в бланки-задания при их печатании. За счет этого значительно сокращается число как первичных, так и вторичных исходных данных, которые необходимо вносить в бланк-задание для расчета. Так, например, число исходных данных сокращается при точении на 26, при обработке отверстий — на 57, при фрезеровании — на 37, при нарезании резьбы — на 68.

Дальнейшим этапом рационализации заполнения исходных данных может быть печатание бланков-заданий не только для различных видов обработки, но и для обрабатываемых материалов и нормализованных инструментов, номенклатура которых в каждой проектной организации сравнительно невелика и четко определяется. За счет этого и предыдущего мероприятия число исходных данных, заполняемых вручную, сокращается при точении на 87, при фрезеровании на 80, при обработке отверстий на 90, при нарезании резьбы на 101.

Таким образом, при соответствующей рационализации заполнения бланков-заданий исходными данными число последних резко сокращается и время, необходимое для заполнения сведений на один проход (один вертикальный столбец), колеблется в пределах 1—3 минут.

На базе приводимых в настоящей книге универсальных алгоритмов могут быть разработаны более простые специализированные алгоритмы для отдельных видов обработки. В этом случае бланки-задания совершенно не содержат

граф для сведений, ненужных для данного вида обработки, и становятся более компактными.

При большом числе рассчитываемых режимов резания целесообразно компоновать бланки-задания в группы по сходным признакам. В этом случае число новых исходных данных для каждой задачи ограничивается двумя—пятью величинами, и ввод их в машину может производиться с пульта управления, что позволяет еще более сократить «ручное» время при расчете режимов резания.

Опыт внедрения автоматизации определения оптимальных режимов резания и технических расчетных норм времени показал, что при правильной организации заполнения бланков-заданий для расчета режимов резания и норм времени на обработку эта операция занимает меньше времени, чем поиск и подготовка исходных данных при обычных методах расчета.

Алгоритмы разработаны для случая, когда заданы требуемая от технологической операции производительность, коэффициент загрузки станка и число одновременно обрабатываемых на станке деталей.

Подобные случаи чаще всего встречаются при проектировании специальных станков и определении режима резания для станка, находящегося в потоке. В этом случае режимы резания являются следствием от заданной производительности.

При определении же режимов резания и нормы времени для технологических операций, осуществляемых на станках, работающих вне потока, производительность обычно не задается, режим резания определяется в соответствии со всеми другими техническими ограничениями, а норма штучного времени на операцию рассчитывается на основе режимов резания, как их следствие.

В этом случае алгоритмы не меняются, но из системы (А) и (А') исключаются неравенства, содержащие свободный член b_3 .

В алгоритме № 1 опускается операция вычисления b_3 и полностью исключается алгоритм № 4. Больше никаких изменений в алгоритмах не требуется.

Для упрощения алгоритма при наличии уверенности в правильности исходных данных могут быть опущены алгоритмы № 6, 7 и 8, служащие для приведения системы (А) к совместному виду.

Ниже приводится пример такого «группового» алго-

ритма для определения режимов резания при обработке отверстий в Ст. 35 и Ст. 45 на вертикально-сверлильном станке 2А150.

Групповой алгоритм

Условия:

Операция — сверлильная, станок — 2А150, материал — Ст. 35, Ст. 45, марка инструмента — Р18, работа с охлаждением:

$$T = 3,0 \left(\Pi + \frac{S_u}{1,3} \right);$$

$$b_1 = \ln \left(\frac{1,459 \cdot 10^6}{D^{0,6} H_B^{0,9} T^{0,25}} \right);$$

$$b_2 = \ln \left(\frac{271,66 \cdot 10^6}{D^2 H_B^{0,7}} \right);$$

$$b_4 = \ln \left[\max \left(\frac{2 \cdot 220}{D}; 32 \right) \right];$$

$$b_5 = \ln \left[\min \left(\frac{8 \cdot 600}{D}; 1400 \right) \right];$$

$$\delta = C_s D^{0,6}; \quad v = \frac{1666,7}{D H_B^{0,75}};$$

$$\Phi = \min(\delta \neq 0; v \neq 0);$$

$$b_6 = \ln(100^{y_s} \Phi),$$

где y_s определяется по таблице

Если $\Phi =$	то $y_s =$
δ	1,0
v	0,7

$$b_7 = 2,4849;$$

$$b_8 = 5,5759.$$

Определить вершины многоугольника решений:

$$\begin{aligned}x_1^{(14)} &= b_1 - \frac{y_v}{y_s} b_6; & x_2^{(14)} &= \frac{b_6}{y_s}; \\x_1^{(15)} &= b_1 - y_v b_8; & x_2^{(15)} &= b_8; \\x_1^{(16)} &= b_4; & x_2^{(16)} &= \frac{b_1 - b_4}{y_v}; \\x_1^{(17)} &= b_1 - y_v \frac{b_1 - b_2}{y_v - y_z}; & x_2^{(17)} &= \frac{b_1 - b_2}{y_v - y_z}.\end{aligned}$$

Если

$$\left\{ \begin{array}{ll} x_1^{(i)} + y_z x_2^{(i)} \leq b_2; \\ x_2^{(i)} \geq b_4; \\ x_1^{(i)} \leq b_5; \\ x_2^{(i)} \geq b_7; \\ y_s x_2^{(i)} \leq b_6; \\ x_2^{(i)} \leq b_8, \end{array} \right. \quad (i = 14, 15, 16, 17)$$

то

$$\begin{aligned}x_{1\text{опт}} &= x_1^{(i)}; & x_{2\text{опт}} &= x_2^{(i)}; \\n_{\text{опт}} &= e^{x_{1\text{опт}}}; & s_{\text{опт}} &= \frac{e^{x_{2\text{опт}}}}{100}; \\t_{\text{маш}} &= \frac{L_{p \cdot x}}{n_{\text{опт}} \cdot s_{\text{опт}}}; \\t_{\text{в}} &= t_1 + \frac{t_2}{q}; \\t_{\text{шт}} &= 1,06 (t_{\text{маш}} + t_{\text{в}}).\end{aligned}$$

Выдать на печать $n_{\text{опт}}$, $s_{\text{опт}}$, $t_{\text{маш}}$, $t_{\text{в}}$, $t_{\text{шт}}$.

В результате расчета определяется штучная норма времени на переход в минуту, соответствующая оптимальному режиму резания с учетом всех заданных технических ограничений.

При полной автоматизации управления станками с помощью электронно-вычислительных машин в машину в закодированном виде вводятся только первичные исходные данные, обычно в виде электрических сигналов с рабочего места. Вся дальнейшая переработка этой первичной информации в машине, как выборка вторичных исходных данных и реализация алгоритмов, должна производиться автоматически.

Все сказанное о подготовке исходных данных для расчета оптимальных режимов резания, за исключением только изменений, связанных с отсутствием задания производительности R , полностью относится к подготовке данных для расчета режимов резания при проектировании агрегатных станков и автоматических линий.

Хотя алгоритмы определения оптимальных режимов резания при обработке в несколько проходов позволяют определять режимы резания при обработке в один проход, все же в первом случае рекомендуется пользоваться специальными алгоритмами как более простыми и компактными.

При определении режимов резания для сверления необходимо пользоваться только алгоритмами для обработки в один проход.

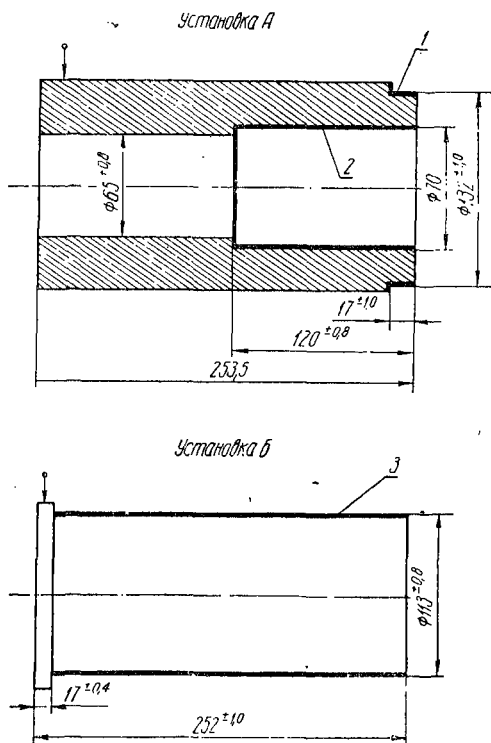


Рис. 22. Операционный эскиз втулки.

**ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
РЕЗАНИЯ ПРИ ОДНОИНСТРУМЕНТНОЙ ОБРАБОТКЕ
НА УНИВЕРСАЛЬНОМ СТАНКЕ**

Ниже приведено несколько примеров определения оптимальных режимов резания при одноинструментной обработке на универсальных станках с помощью универсальной цифровой автоматической вычислительной машины «Урал-1».

Пример 1. Определить штучную норму времени и оптимальные режимы резания на обработку втулки (рис. 22).

Обработка производится на станке 1К37 в две установки.

Установка А

Переход 1. Обточить $\varnothing 152$ до $\varnothing 132$ на длине $17 \pm 0,1$, начерно.

Переход 2. Расточить $\varnothing 65$ до $\varnothing 70$ на длине 120, начерно.

Установка Б

Переход 3. Обточить $\varnothing 152$ до $\varnothing 113$ на длине 235, начерно.

Проходные резцы установлены в резцедержавке, расточной — в жесткой оправке $\varnothing 45$.

Деталь крепится в трехкулачковом самоцентрирующем патроне с ручным зажимом.

Все необходимые для расчета данные приведены в бланке-задании исходных данных для расчета (форма № 1). Исходные данные, общие для всех случаев точения, заносятся в бланк заранее, при его печатании, выделены жирным шрифтом.

Вспомогательное время для первого и второго переходов установки А определяется:

$$t_{в(1,2)} = \frac{t_2}{2} + t_1 = 0,24 + 0,14 = 0,38 \text{ мин.}$$

для третьего перехода установки Б:

$$t_{в(3)} = t_2 + t_1 = 0,48 + 0,14 = 0,62 \text{ мин.}$$

Решение задачи приведено в таблице.

Машина выдает на печать для каждой величины два ряда цифр:

верхний ряд означает порядок величины;

второй — значение величины.

Сложив нормы штучного времени на переходы, получаем норму штучного времени на операцию

$$T_{шт} = 0,85 + 1,16 + 6,82 = 8,83 \text{ мин.}$$

Бланк-
для расчета оптимальных режимов ре
(токарная обработка)

Деталь		Втулка						
		Исходные данные,						
операции		п е р е						
			1	2	3	4	5	
<u>СТ</u>	1К37	<u>И</u>	Резец					r_x
			прох.	раст.	прох.	—		
$n_{ст. min}$	29	<u>МИ</u>	Т15К6					$S_{и}$
$n_{ст. max}$	800	M'	2,5	2,5	2,5			<u>УИ</u>
$s'_{ст. min}$	12	m	0,28	0,28	0,28			<u>ТО</u>
$s'_{ст. max}$	215	V'_{min}	$19 \cdot 10^3$	$19 \cdot 10^3$	$19 \cdot 10^3$			П
N_H	14	t'_{min}	50	50	50			<u>СП</u>
$P_{под.ст}$	1050	K_5	1	1	1			K_7
η	0,74	K_{11}	1	1	1			<u>а'</u>
E_p	1,8	K_{12}	1	1	1			<u>L_{p3}</u>
t_1	0,14	K_{18}	1	1	1			L_{p-x}
t_2	0,48	K_{21}	1	1	1	1	1	K_{13}
<u>УД</u>	ручная	t_B	0,38	0,38	0,62			$H_{ск}$
<u>$G_{заг}$</u>	30,81	C'_v	$88,90 \cdot 10^4$					W
<u>БЗ</u>	Самоц. патрон, вручную	C''_v	0	0	0	0	0	K_{14}
<u>R</u>	0	x_v	0,18	0,18	0,18			<u>ОД</u>
<u>r_R</u>	0	y_v	0,35	0,35	0,35			K_{23}
<u>K'_3 срп</u>	0	z_v	1	1	1			K_{24}

задание

зания при одноинструментной обработке
ка всех видов)

ОПЕРАЦИЯ: токарная, черновая

относящиеся к

х о д а м

1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	K_{15}	1	1	1		
6,3	7,4	6,3			K_{20}	1	1	1		
В резцедержат.					$[G_1]$	15	15	15		
7 кл.	7 кл.	7 кл.			K_9	0,9	0,9	0,9		
3,0	3,0	3,0			$[r]$	1,5	0,5	1,5		
Без окалины					K_4	1	1	1		
1	1	1			K_{16}	0,97	0,87	0,97		
1 000	250	1 950			$[\delta]$	2	2	2		
17	120	235			K_{17}	1	1	1		
23	125	242			K_{20}	1	1	1		
1	1	1	1	1	$[l_p]$	45	10	45		
0	0	0	0	0	$[b]$	20	25	20		
Без охлаждения					$[h]$	30	25	30		
1	1	1			K_1	1,08	1,08	1,08		
Нар. обт.	Рас-точка	Нар. обт.			$[Гр]$	Плоская, без фаски				
0	0	0	0	0	K_8	1	1	1		
0	0	0	0	0	f_p	0,1	0,1	0,1		

	×	×	1	2	3.	4	5	×
$\overline{MD}$	Ст. 45	n_v	1,75	1,75	1,75			K_{25}
$E_{\text{заг}}$	$2,1 \cdot 10^4$	u_v	0	0	0	0	0	K_{26}
$E_{\text{дсрж}}$	$2,1 \cdot 10^4$	r_v	0	0	0	0	0	$K_{11Б}$
$\overline{3Г}$	Горяче-катаная	C_z	27,9		27,9			K_3
K_6	1,0	C'_z	$2\ 210 \cdot 10^5$					$K_{жк}$
H_B	240	C'_z	0	0	0	0	0	K_{Φ}
K_{19}	0,128	x_z	1	1	1			$\overline{L_{\text{заг}}}$
Дата		y_z	0,75	0,75	0,75			$\overline{D_{\text{заг}}}$
		z_z	1	1	1			$\overline{B}$
		n_z	0,75	0,75	0,75			S_p
		u_z	0	0	0	0	0	z
Проверил		r_z	0	0	0	0	0	$\overline{D}$
		C_x	0,02					d
		x_x	1,2	1,2	1,2			K_9
		y_x	0,65	0,65	0,65			K_{10}
Составил		z_x	0	0	0	0	0	$\overline{G}$
		n_x	1,5	1,5	1,5			K_2
		u_x	0	0	0	0	0	V'_{max}

Примечание. Бланк-задание (форма № 1) приведен в пас-по сходным признакам и при использовании сокращенного алгорит-производительности) применяется форма № 1с (Т), которая

1	2	3	4	5	×	1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	$f_{\text{заг}}$	0,3	0,3	0,3		
0	0	0	0	0	C_{II}	0	0	0	0	0
200	200	200	200	200	x_{H}	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	z_{H}	0	0	0	0	0
0,15	0,15	0,15			n_{II}	0	0	0	0	0
100	100	100	100	100	u_{H}	0	0	0	0	0
252	252	252			$C_{\text{Ф}}$	0	0	0	0	0
152	152	152			$x_{\text{Ф}}$	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	$z_{\text{Ф}}$	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	$r_{\text{Ф}}$	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	$C_{\text{ч}}$	0	0	0	0	0
132	70	113			$x_{\text{ч}}$	0	0	0	0	0
0	0	0			$z_{\text{ч}}$	0	0	0	0	0
1	1	1			$n_{\text{ч}}$	0	0	0	0	0
0,9	0,8	0,9			$\overline{00}$	0	0	0	0	0
45°	45°	45°			C_s	0	0	0	0	0
1	1	1			p	0	0	0	0	0
$80 \cdot 10^3$	$80 \cdot 10^3$	$80 \cdot 10^3$			—	—	—	—	—	—

тощем примере с методической целью. При группировании задача (исключающего согласование исходных данных и учет заданий) приводится ниже.

Деталь	Исходные данные для расчета оптимальных режимов резания и нормы времени на операцию				Форма № 1с(Т)	
Втулка					Обработка валов	
Вид обработки	Точение наружное (1), расточка (2)	Тип режущего инструмента	Резец проходной (1,3) Резец расточной (2)	Обрабатываемый материал	Ст. 45	
Характер обработки	Черновая	Материал режущей части	T15K6	H Б	240	
Марка и основные размеры станка			1К37			
Способ установки детали	Ручной	Способ базирования и зажима детали		Самоц. патрон, вручную	Вес	30, 81

Сведения, относящиеся к переходам

№ перех.	1	2	3	4	5	6	7	8	№	1	2	3	4	5	6	7	8	№	1	2	3	4	5	6	7	8
И	Прох.	Раст.	Прох.						K _ж	0,15	0,15	0,15						l _p	45	10	45					
МИ	T15K6	T15K6	T15K6						L _{заг}	252	252	252						K ₁	1,08	1,08	1,08					
П	3	3	3						D _{заг}	152	152	152						K ₄	1	1	1					
S _н	6,3	7,4	6,3						D	130	70	113						K ₈	1	1	1					

H_{CK}	0	0	0					$\overline{d}$	0	0	0					Элементы режима резания и нормы времени							
K_6	1	1	1					K_9	1	1	1												
K_7	1	1	1					K_{10}	0,9	0,8	0,9					n	166	271	138				
K_{14}	1	1	1					φ	45	45	45					s	0,33	0,68	0,6				
$\overline{a'}$	1000	250	1950					K_2	1	1	1					t	10	2,5	8,0				
$\overline{L_{\text{пз}}}$	17	120	235					K_{15}	1	1	1					t_M	0,48	0,68	5,85				
$L_{\text{п-х}}$	23	125	242					K_{20}	1	1	1					t_B	0,38	0,38	0,62				
φ_1	15	15	15					$\overline{b}$	20	25	20					$t_{\text{шт}}$	0,85	1,16	6,82				
r	1,5	0,5	1,5					$\overline{h}$	30	25	30					Составил				$T_{\text{шт}} = 8,83$			

Таблица 6

**Элементы режимов резания и нормы времени для черновой
токарной обработки втулки**

№ пе- реходов	Определяемая величина	Данные, выданные машиной на печать	Принятые зна- чения величин
1	$n_{\text{опт}}$	00000003 16634518	166 об/мин
	$s_{\text{опт}}$	00000000 33025182	0,33 мм/об
	$t_{\text{опт}}$	00000001 99995957	1,0 мм
	$i_{\text{черн}}$	00000001 10000321	1
	$t_{\text{маш}}$	—00000000 41997311	0,42 мин
	$t_{\text{шт}}$	—00000000 84983741	0,85 мин
	$t_{\text{чист}}$	—00000000 00004043	0
2	$n_{\text{опт}}$	00000003 27142849	271 об/мин
	$s_{\text{опт}}$	—00000000 67687249	0,68 мм/об
	$t_{\text{опт}}$	00000001 24999060	2,5 мм
	$i_{\text{черн}}$	00000001 10000731	1
	$t_{\text{маш}}$	—00000000 67893703	0,68 мин
	$t_{\text{шт}}$	00000001 11253002	1,13 мин
	$t_{\text{чист}}$	—00000000 00000940	0
3	$n_{\text{опт}}$	00000003 13781337	138 об/мин
	$s_{\text{опт}}$	—00000000 60001730	0,6 мм/об
	$t_{\text{опт}}$	00000001 80000327	8,0 мм
	$i_{\text{черн}}$	00000001 24399073	2
	$t_{\text{маш}}$	00000001 58488190	5,85 мин
	$t_{\text{шт}}$	00000001 68173014	6,82
	$t_{\text{чист}}$	00000001 34999356	3,5 мм

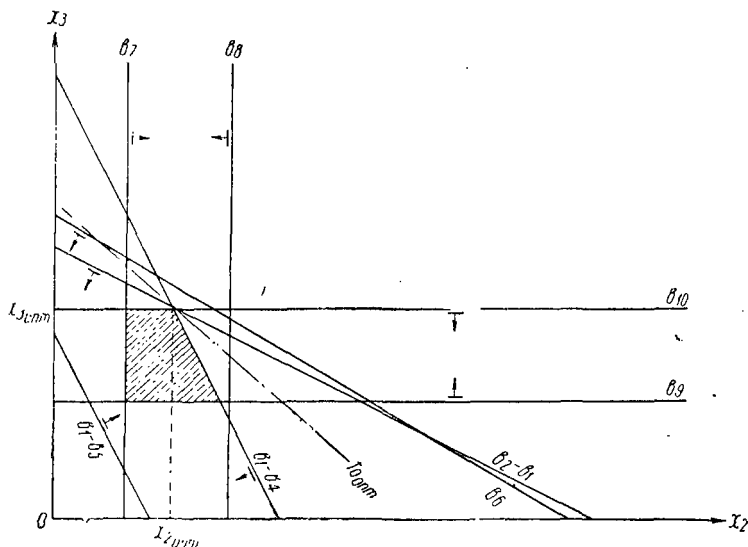


Рис. 23. График определения оптимального режима резания для проточки пояски на втулке (переход 1).

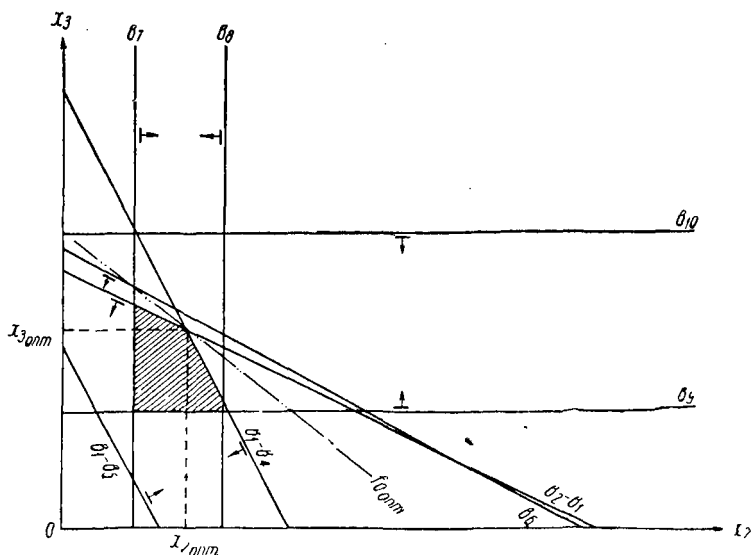


Рис. 24. График определения оптимального режима резания для черновой обточки втулки с припуском на сторону 19,5 мм (переход 3).

Графики, иллюстрирующие решение задачи для 1-го и 3-го переходов, изображены на рис. 23 и 24.

Граничные прямые на графиках обозначены свободными членами неравенств.

Из рис. 23 и 24 следует, что полученные режимы обеспечивают наименьшую себестоимость детали. При этом полностью используются кинематические и динамические возможности станка и режущие возможности инструмента.

При решении данного примера заполнение бланк-задания для трех переходов заняло 3 минуты. Решение всей задачи с вводом данных на ЭВМ «Урал-1» заняло 4,5 минуты. Таким образом, нормирование операций с определением оптимальных режимов резания для трех переходов заняло 7,5 минуты.

При применении быстродействующих машин типа «Урал-2», «Минск», «Стрела», «М-20» и т. п. это время может быть сокращено до 3—4 минут. Ручное же решение этой задачи с применением арифмометров требует 8—10 часов.

Пример 2. Определить штучную норму времени и оптимальные режимы резания на фрезерование дисковой фрезой паза 16A₃ в рычаге (рис. 25).

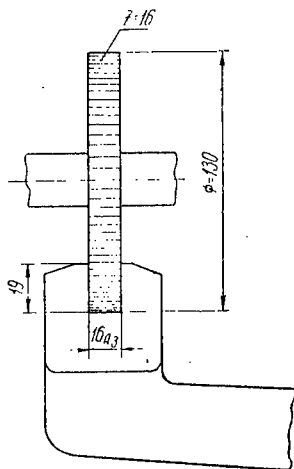


Рис. 25. Операционный эскиз фрезерования паза в рычаге.

Все необходимые для расчета данные приведены в форме № 3с (Ф) для групповой обработки по сокращенному алгоритму.

Деталь Рычаг	Исходные данные для расчета оптимальных режимов резания и нормы времени на операцию																Формы № 3с (Ф) Все виды фрезерования										
Вид обработки	Фрезерование								Типы режущих инструментов				Фреза дисковая трехсторонняя				Обрабатываемый материал				Ст. 35						
Характер обработки	Черновая								Материалы режущей части				Р9				НБ				170						
Марка и основные размеры станка												6Н82Т															
Способ установки		Ручной		Способ базирования и зажима детали								Прихват винтовой на плоскости								Вес		7,8					
Сведения, относящиеся к переходам																											
№	1	2	3	4	5	6	7	8	№	1	2	3	4	5	6	7	8	№	1	2	3	4	5	6	7	8	
И	Фреза дисковая трехсторонняя								a'	1 900								K ₂	1,37								
МИ	P9								L _{рез}	15								K ₁₈	1,3								
П	3,5								L _{р·х}	74								Элементы режима резания и нормы времени									
S _и	11,0								K ₁₁	1,25								n	235								
									s _н	0,14																	
H _{ск}	0								K ₁₄	0,5								t	19								
K ₅	1								B	14								t _м	0,14								
K ₆	1,1								z	16								t _в	0,93								
																		t _{шт}	1,14								
K ₇	1								D	130								Составил								T _{шт} =1,14	

Решение задачи приведено в таблице 7.

Таблица 7

Элементы режима резания и нормы времени
при фрезеровании паза рычага

№ пере- ходов	Определяемая величина	Данные, выданные машиной на печать	Принятые зна- чения величины
1	$n_{\text{опт}}$	00000003 23455782	235 об/мин
	$s_z \text{ опт}$	-00000000 13721411	0,14 мм/зуб
	$t_{\text{опт}}$	00000002 18999076	19 мм
	$t_{\text{маш}}$	-00000000 14217391	0,14 мин
	$t_{\text{шт}}$	00000001 11390147	1,14 мин
	$t_{\text{чист}}$	-00000000 00000924	0

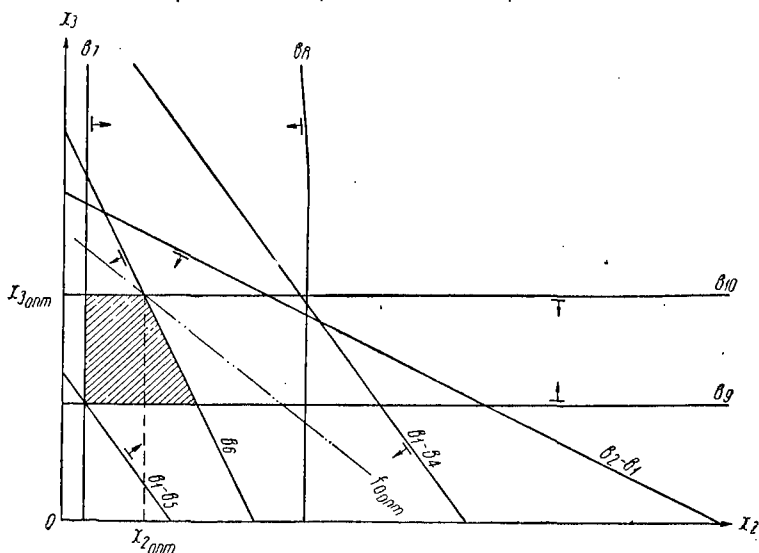


Рис. 26. График определения оптимального режима резания при фрезеровании паза в рычаге.

Деталь		Исходные данные для расчета оптимальных режимов резания и нормы времени на операцию																Формат № 4с(1)													
Плита																		Сверление, рассверливание, зенкерование, развертывание, цоквание													
Вид обработки		Сверление								Типы режущих инструментов								Обрабатываемый материал													
Характер обработки		Черновая (сквозное отверстие)								Материалы режущей части								P18													
Марка и основные размеры станка																2A150															
Способ установки детали								Ручной		Способ базирования и зажима детали								Тиски винтовые								Вес в кг		15,0			
Сведения, относящиеся к переходам																															
№	1	2	3	4	5	6	7	8	№	1	2	3	4	5	6	7	8	№	1	2	3	4	5	6	7	8					
И	Сверло								K ₁₃	1								C _s	0,065												
МИ	P18								K ₁₄	1								p	0,6												
П	0,4								K ₁₈	1								Элементы режима резания и нормы времени													
S _н	9,9								K ₂₁	1								n	600												
K ₅	1								a'	2250								s	0,15												
K ₆	0,9								L _{рез}	100								t	22,5												
K ₇	0,8								L _{p-x}	135								t _м	1,5												
K ₁₁	1								D	45								t _в	0,4												
																		t _{шт}	2,01												
																		Составил								T _{шт} 2,01					

Исходные данные, общие для всех случаев фрезерования, заносимые в бланк заранее, при его печатании, выделены жирным шрифтом.

Вспомогательное время на операцию равно

$$t_{\text{в}} = t_1 + t_2 = 0,27 + 0,66 = 0,93 \text{ мин.}$$

График, иллюстрирующий решение задачи, изображен на рис. 26.

Пример 3. Определить штучную норму времени и оптимальный режим резания при сверлении отверстия $\varnothing 45$ в жесткой отливке из серого чугуна.

Все необходимые для расчета данные приведены в форме № 4с (0) для групповой обработки по сокращенному алгоритму.

Вспомогательное время на операцию равно

$$t_{\text{в}} = t_1 + t_2 = 0,08 + 0,32 = 0,4 \text{ мин.}$$

Решение задачи приведено в таблице 8.

Таблица 8

Элементы режима резания и нормы времени
при сверлении отверстия $\varnothing 45$ в сером чугуне

№ переходов	Определяемая величина	Данные, выданные машиной на печать	Приятые значения величин
1	$n_{\text{опт}}$	00000003 59970140	600 об/мин
	$s_{\text{опт}}$	—00000000 15100384	0,15 мм/об
	$t_{\text{опт}}$	0000002 22501736	22,5 мм ($D = 45 \text{ мм}$)
	$i_{\text{чери}}$	—00000000 99997081	1
	$t_{\text{маш}}$	00000001 15130204	1,5 мин
	$t_{\text{шт}}$	00000001 20113983	2,01 мин
	$t_{\text{чист}}$	—00000000 —00001736	0

ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ДЛЯ МНОГОИНСТРУМЕНТНЫХ НАЛАДОК АГРЕГАТНЫХ СТАНКОВ И АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

Ниже приведено несколько примеров определения оптимальных режимов резания для различных типов многоинструментных наладок агрегатных станков и автоматических линий.

Во всех случаях при решении задачи на ЭВМ «Урал-1» применялись «групповые» сокращенные алгоритмы, составленные на основе общего, универсального алгоритма (глава III). Группирование производилось по признакам: вид обработки — обрабатываемый материал — тип режущего инструмента — марка материала режущей части инструмента. Заданная производительность во всех случаях предполагалась неизменной.

Пример 1. (рис. 27). Определить оптимальные режимы резания для многоинструментной наладки агрегатного станка, состоящей из 80 одинаковых сверл $\varnothing 6,5$ мм. Заготовка — полоса из Ст. 5, $H_B = 130$, горячекатаная.

Оптимальные режимы резания, расчетные периоды стойкости и периоды смены инструментов приведены в таблице 9.

Коэффициент перегрузки электродвигателей

$$K_{\text{пер}} = \frac{29,9}{20,0} = 1,5$$

может быть допущен, так как время резания равно

$$t_{\text{маш}} = \frac{L_{\text{рез}}}{S_{1\text{м}}} = \frac{8}{135,4} = 0,06 \text{ мин.}$$

Таблица 9

Оптимальные режимы резания при обработке полосы (сверление 80 отверстий) на агрегатном станке

Определяемые величины	№ режущих инструментов (шпинделей)
	1—80
$T_{\text{расч}} \text{ мин}$	42,0
$T_{\text{орг}} \text{ мин}$	60,0
$S_{1\text{м}} \text{ мм/мин}$	135,4
$S_{2\text{м}} \text{ мм/мин}$	—
$n_{\text{онт}} \text{ об/мин}$	912,3
$s_{\text{онт}} \text{ мм/об}$	0,15
$P_x \text{ кг}$	138,92
$M_{\text{кр}} \text{ кг мм}$	299,62
$N_{\text{эф}} \text{ кВт}$	0,28
$\sum_1^q P_x \text{ кг}$	11114,2
$\frac{1}{\eta} \sum_1^q N_{\text{эф}} \text{ кВт}$	29,9

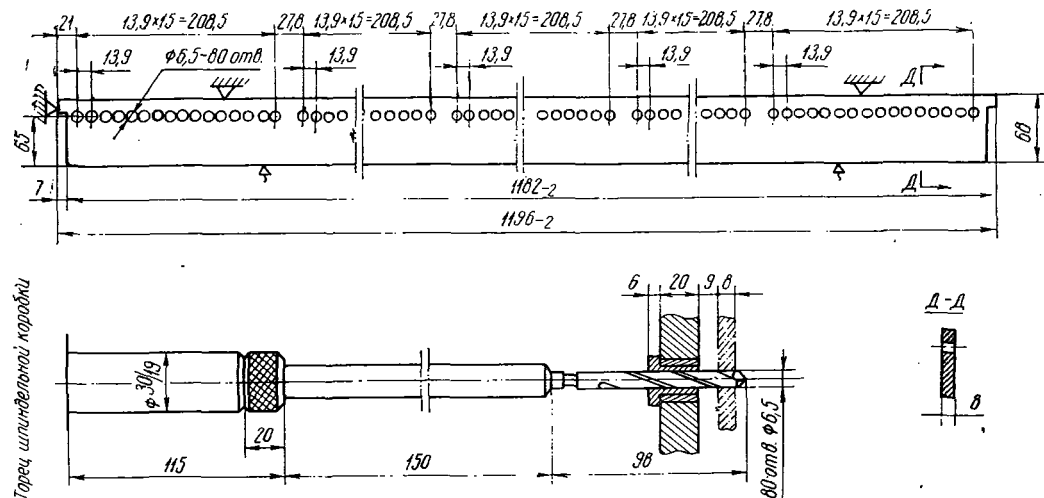


Рис. 27. Операционный чертеж обработки полосы (сверление 80 отверстий $\phi 6,5$) и схема инструментальной наладки.

На заполнение бланка исходных данных потребовалось 1,5 минуты. Подготовка и ввод в машину исходных данных заняли 2 минуты. Решение задачи на ЭВМ «Урал-1» продолжалось 0,8 минуты. Всего на определение элементов оптимального режима резания потребовалось 4,3 минуты.

Пример 2. Определить оптимальные режимы резания для многоинструментной наладки агрегатного станка при обработке отверстий во фланце ступицы (рис. 28 и 29). Заготовка — отливка из ковкого чугуна КЧ-35-10, $H_B = 121 \div 149$, отожженная. Оптимальные режимы резания, расчетные стойкости и периоды смены инструментов приведены в таблице 10.

Таблица 10

Оптимальные режимы резания при обработке отверстий во фланце ступицы на агрегатном станке

Определяемые величины	№ режущих инструментов (шпинделей)				
	1, 2, 3	4, 5, 6, 7, 8, 9	10, 11, 12, 13, 14, 15	16, 17, 18, 19, 20, 20, 21	22, 25, 27
$T_{расч} \text{ мин}$	144,72	221,9	443,8	20,21	16,0
$T_{орг} \text{ мин}$	630 (1,5 см)	630 (1,5 см)	1260 (3 см)	60	60
$S_{1м} \text{ мм/мин}$	52,5	52,5	52,5	52,5	—
$S_{2м} \text{ мм/мин}$	—	—	—	—	—
$n_{опт} \text{ об/мин}$	351,87	188,73	193,94	24,15	101,38
$S_{опт} \text{ мм/об}$	0,149	0,278	0,271	2,17	1,5
$P_x \text{ кг}$	114,62	351,72	2,68	0	0
$M_{кр} \text{ кг/мм}$	437,06	2 500,4	40,87	72,99	1 200
$N_{эф} \text{ кВт}$	0,158	0,484	0,008	0,002	0,126
$\sum_1^q P_x \text{ кг}$	2469,2				—
$\frac{1}{\tau_i} \sum_1^q N_{эф} \text{ кВт}$	5,22				0,475

На заполнение бланка исходных данных потребовалось 5,5 минуты. Подготовка и ввод в машину исходных данных заняли 14 минут. Решение задачи на ЭВМ «Урал-1» продолжалось 3,6 минуты. Всего на определение оптимальных режимов резания для всей наладки потребовалось 23,1 минуты.

Пример 3. Определить оптимальные режимы резания для многоинструментной наладки агрегатного станка при обработке отверстий в корпусе насоса (рис. 30). Заготовка-отливка из серого чугуна СЧ15-32, $H_B = 163 \div 229$.

Оптимальные режимы резания, расчетные стойкости и периоды смены инструментов приведены в таблице 11.

Таблица 11

**Оптимальные режимы резания
при обработке отверстий в корпусе насоса
на агрегатном станке**

Определяемые величины	№ режущих инструментов		
	1—2	3—4	5—6
$T_{\text{расч}} \text{ мин}$	56,2	418,6	275,2
$T_{\text{орг}} \text{ мин}$	120,0	1260,0	630,0
$S_{1\text{м}} \text{ мм/мин}$	60,36	—	60,36
$S_{2\text{м}} \text{ мм/мин}$	—	19,78	—
$n_{\text{опт}} \text{ об/мин}$	95,8	193,33	95,12
$s_{\text{опт}} \text{ мм/об}$	0,63	0,1	0,63
$P_x \text{ кг}$	73,78	110,43	4,68
$M_{\text{кр}} \text{ кг мм}$	508,82	401,21	66,51
$N_{\text{эф}} \text{ кВт}$	0,500	0,080	0,065
$\sum_1^q p_x \text{ кг}$	377,8		
$\frac{1}{\eta} \sum_1^q N_{\text{эф}} \text{ кВт}$	1,85		

[illegible]

Пример 4. Определить оптимальные режимы резания для многоинструментной наладки барабанного агрегатного станка при обработке отверстий и нарезании резьбы в корпусе насоса (рис. 31 и рис. 32). Заготовка — отливка из алюминиевого сплава АЛ-11, $H_{B-71-80}$.

На заполнение бланка исходных данных потребовалось 13 минут. Подготовка и ввод в машину исходных данных заняли 18 минут. Решение задачи на ЭВМ «Урал-1» продолжалось 5 минут. Всего на определение оптимального режима резания для всей наладки потребовалось 36 минут.

Таблица 12

**Оптимальные режимы резания при обработке корпуса насоса
на барабанном агрегатном станке**

Определяемые величины	№ инструментов (шпинделей)						
	1—6; 23—28	7—12; 29—34	13—18; 29—40	19;41	20;42	21;43	22;44
$T_{расч} \text{ мин}$	47,2	49,5	23,2	70,8	42,7	141,7	218,5
$T_{орг} \text{ мин}$	84,0	120,0	60,0	210,0	1260,0	420,0	630,0
$S_{1м} \text{ мм/мин}$	53,0	53,0	—	53,0	53,0	53,0	53,0
$S_{2м} \text{ мм/мин}$	—	—	219,0	—	—	—	—
$n_{опт} \text{ об/мин}$	675,12	1150,94	146,0	1060,0	354,0	378,0	530,0
$s_{опт} \text{ мм/об}$	0,079	0,046	1,5	0,051	0,15	0,14	0,10
$P_x \text{ кг}$	51,0	32,0	—	112,5	21,0	9,5	4,0
$M_{кр} \text{ кг мм}$	—	—	—	—	—	—	—
$N_{эф} \text{ квт}$	0,10	0,10	0,127	0,42	0,63	0,09	0,38
$\sum_1^q P_x \text{ кг}$	$2 \times 640,0$		0,76	—			
$\frac{1}{\eta_1} \sum_1^q N_{эф} \text{ квт}$	$2 \times 3,02$		—	—			

Пример 5. Определить оптимальные режимы резания для многоинструментной наладки агрегатного станка с одной вертикальной и тремя горизонтальными силовыми головками при обработке внешнего балансира (рис. 33). Заготовка — поковка из стали 45ЛК-1, H_B -217 после отжига.

Заданная производительность 27 шт/час. $K_{загр}=0,66$. Оптимальные режимы резания, расчетные стойкости и периоды смены инструментов приведены в таблице 13.

На заполнение бланка исходных данных потребовалось 7 минут. Подготовка и ввод в машину исходных данных

заняли 9 минут. Решение задачи на ЭВМ «Урал-1» продолжалось 2,5 минуты.

Всего на определение оптимального режима резания для всей наладки потребовалось 16,5 минуты.

Таблица 13

Оптимальные режимы резания при обработке
балансира внешнего

Определяемые величины	№ инструментов (шпинделей)			
	1—2	3—4	5—6	7—8
$T_{расч} \text{ мин}$	126,7	19,7	42,0	20,1
$T_{орг} \text{ мин}$	1260,0	60,0	120,0	60,0
$S_{1M} \text{ мм/мин}$	27,7	28,8	21,74	16,87
$S_{2M} \text{ мм/мин}$	—	—	—	—
$n_{опт} \text{ об/мин}$	118,72	203,56	24,15	175,19
$s_{опт} \text{ мм/об}$	0,230	0,142	0,9	0,096(мм/зуб)
$P_x \text{ кг}$	582,21	3,10	0	1148,82
$M_{кр} \text{ кг мм}$	3754,84	35,40	72,90	18189,5
$N_{эф} \text{ кВт}$	0,457	0,0074	0,0018	3,27
$\sum_1^q P_x \text{ кг}$	1164,42	6,20	0	2297,64
$\frac{1}{\eta} \sum_1^q N_{эф} \text{ кВт}$	0,914	0,0148	0,0036	6,54

Л И Т Е Р А Т У Р А

Айзерман М. А. Кибернетика и автоматизация производства, серия IV. Изд-во «Знание», 1960.

Архангельский Н. А., Зайцев Б. И. Автоматические цифровые машины. Физматгиз, 1959.

Ачеркан Н. С. и др. Металлорежущие станки. Машгиз, 1958.

Барсов А. С. Что такое линейное программирование. Физматгиз, 1959.

Берг А. И. Электроника и кибернетика. Известия высших учебных заведений. Радиотехника, т. 3, № 1, 1960.

Брук И. С. Перспективы применения управляющих машин в автоматизации. В кн. «Сессия АН СССР по научным проблемам автоматизации производства», 1956. Изд-во АН СССР, 1957.

Бут Э. и Бут К. Автоматические цифровые машины. Физматгиз, 1959.

Владзиевский А. П. Автоматические линии в машиностроении, ч. I и II. Машгиз, 1958.

Габр Я. Линейное программирование. Госстатиздат, 1960.

Гасс С. Линейное программирование. Физматгиз, 1961.

Гёбель Х. Компановка агрегатных станков и автоматических линий. Машгиз, 1959.

Герчук Я. П. Линейное программирование. Московское городское общество по распространению политических и научных знаний, 1959.

Гильман А. М. Об автоматизации проектирования технологических карт механической обработки при помощи ЭВМ. Диссертация, Горький, 1959.

Гниденко Б. В., Королюк В. С. Элементы программирования. Физматгиз, 1961.

Горанский Г. К. Рациональное использование металлорежущих станков. Госиздат БССР, Минск, 1959.

- Горанский Г. К. Резание металлов. Госиздат БССР, Минск, 1955.
- Грановский Г. И. Кинематика резания. Машгиз, 1948.
- Дикущин В. И. Агрегатные станки и автоматические линии, ЭСМ, т. 9, Машгиз, 1949 и 1950.
- Еникеев Х. М. Жесткость металлорежущих станков. ЦБТИ МСС, 1950.
- Зузанов Г. И. Агрегатные станки. Машгиз, 1948.
- Каган Б. М., Тер-Микаэляни Г. М. Решение инженерных задач на автоматических цифровых вычислительных машинах. Госэнергоиздат, 1958.
- Канторович Л. В. Математические методы организации и планирования производства. Изд-во ЛГУ, 1939.
- Канторович Л. В., Гавурин М. К. Математические методы анализа грузопотоков. Сб. АН СССР «Проблемы повышения эффективности работы транспорта», 1953.
- Канторович Л. В. Экономический расчет наилучшего использования ресурсов. Изд-во АН СССР, 1959.
- Клушин М. И. Справочник по режимам резания. Машгиз, 1948.
- Кораблев П. А. Обработка на агрегатных станках в приборостроении. Машгиз, 1960.
- Крайзмер Л. П. Техническая кибернетика. Госэнергоиздат, 1958.
- Креко Б. Лекции по линейному программированию, перевод с венгерского. АН СССР, Сиб. отд., 1958.
- Курош А. Г. Курс высшей алгебры. Физматгиз, 1959.
- Лоскутов В. И. Математические и управляющие машины на железнодорожном транспорте. «Железнодорожный транспорт», 1958, № 7.
- Люстерник Л. А. Выпуклые фигуры и многогранники. Гостехиздат, 1956.
- Ляпунов А. А., Шестопал Г. А. Начальные сведения о решении задач на электронных вычислительных машинах. Сб. «Математическое просвещение», вып. 1. Гостехиздат, 1957.
- Ляпунов А. А., Шестопал Г. А. Об алгоритмическом описании процессов управления. Сб. Математическое просвещение, вып. 2, 1957.
- Мак-Кракен Д. Д. Программирование для цифровых вычислительных машин. Изд. иностр. лит., 1960.
- Марков А. А. Теория алгоритмов. Тр. матем. ин-та АН СССР, вып. 42, 1954.
- Михайлов О. А. Математическая статистика и линейное программирование в черной металлургии. Металлургиздат, 1961.
- Новиков П. С. Элементы математической логики. Физматгиз, 1959.
- Панкин А. В. Основные вопросы наиболее выгодного резания металлов. Машгиз, 1948.
- Панкин А. В. Теория резания металлов. Машгиз, 1961.
- Рябко Х. Г. и др. Малые агрегатные станки. Машгиз, 1960.
- Соколовский А. П. Жесткость в технологии машиностроения. Машгиз, 1946.
- Соколовский А. П. Расчеты точности обработки на металлорежущих станках. Машгиз, 1952.

Соколовский Ю. И. Кибернетика настоящего и будущего. Харьков, 1959.

Солодовников В. В. Основные черты технической кибернетики. «Автоматическое управление и вычислительная техника», Сб., вып. I, Машгиз, 1958.

Темчин Г. И. Теория и расчет многоинструментных наладок. Машгиз, 1957.

Темчин Г. И. Методика и руководство по расчету режима резания на многоинструментных станках. ЦБТИ, 1957.

Фельдштейн Э. И. и др. Режимы резания на токарных автоматах. Машгиз, 1960.

Фельдштейн Э. И. Обрабатываемость сталей. Машгиз, 1953.

Черников С. И. Линейные неравенства. УМН, т. 8, вып. 2, 1953.

Черникова Н. В. Наименьшие и наибольшие значения линейной формы на многограннике. УМН, т. 12, вып. 2, 1957.

Шаумян Г. А. Автоматы. Машгиз, 1952.

Эрпшер Ю. Б. Автоматические поточные линии. Сб. МОНИТОМАШ. Машгиз, 1951.

Якобсон М. О. Технологическое обеспечение заданного качества поверхности при механической обработке. ЦБТИ, МС и ИП СССР, 1955.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Глава I.	
Анализ основных уравнений, характеризующих процессы резания металлов, технические ограничения и критерии оптимальности при выборе режимов резания на металлорежущих станках	9
Уравнения для определения стойкости режущих инструментов	11
Уравнение оценочной функции (критерия оптимальности) для различных случаев	16
Уравнения технических ограничений	19
Глава II.	
Определение оптимальных режимов резания при одноинструментной обработке на универсальном станке	41
Получение системы линейных алгебраических уравнений и неравенств теоретической модели оптимальных режимов резания	41
Математическое моделирование оптимального режима резания при одноинструментной обработке в несколько проходов на универсальном станке	52
Алгоритмы определения оптимального режима резания при одноинструментной обработке на универсальном станке в несколько проходов	81
Алгоритмы определения оптимального режима резания при одноинструментной обработке в один проход на универсальном станке	111
Глава III.	
Определение оптимальных режимов резания при многоинструментной обработке на агрегатных станках и автоматических станочных линиях	119
Определение стойкостей режущих инструментов многоинструментных наладок агрегатных станков и автоматических станочных линий	121
Определение оптимальных режимов резания для многоинструментных наладок агрегатных станков и автоматических станочных линий	127
Алгоритмы определения оптимальных режимов резания на агрегатных станках и автоматических линиях инструментами, установленными в одной шпиндельной коробке.	135

Глава IV.

Рекомендации по внедрению автоматизации определения оптимальных режимов резания с помощью цифровых электронно-вычислительных машин и примеры решения задач	159
Подготовка исходных данных для расчета	159
Примеры определения оптимальных режимов резания при одноинструментной обработке на универсальном станке	165
Примеры определения оптимальных режимов резания для многоинструментных иаладок агрегатных станков и автоматических линий.	179
Л и т е р а т у р а	188

Горанский, Георгий Константинович.

Расчет режимов резания при помощи
электронно-вычислительных машин.
Минск, Госиздат БССР, 1963

6П4.6

Редактор *М. Каспер*
Художник *Л. Усачев*
Художественный редактор *С. Русак*
Технический редактор *В. Ермоленко*
Корректор *Н. Лебедева*

АТ 02051. Сдано в набор 23/VII 1962 г. Подп. к печати 27/IV 1963 г. Тираж 6000 экз.
Формат 84×108¹/₃₂. Физ. печ. л. 6+2 вкл.сйки. Усл. печ. л. 9,84. Уч.-изд. л. 10,07.
Зак. 1215. Цена 66 коп.

Полиграфический комбинат им. Я. Коласа
Главиздата Министерства культуры БССР
Минск, Красная, 23.