

61:88-5/3586-0

ЗАВОД-ВТУЗ при ПО ТУРБОСТРОЕНИЯ  
"ЛЕНИНГРАДСКИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ЗАВОД"

---

На правах рукописи

 ВАСИЛЬКОВ Дмитрий Витальевич

УДК 621.914.1.014

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ТОЧНОСТИ ПРИ  
ОБРАБОТКЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ МАЛОЖЕСТКИХ ЗАГОТОВОК

Специальность 05.03.01 - процессы механической  
и физико-химической обработки, станки и инструмент

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ  
доктор технических наук, профессор  
В.Л.ВЕЙЦ

ЛЕНИНГРАД  
1987

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр
В В Е Д Е Н И Е . . . . .	5
I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ . . . . .	10
I.1. Анализ возможностей повышения эффективности использования станков с ЧПУ при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок . . . . .	10
I.2. Проблемы адаптации фрезерования маложестких заготовок по статическим параметрам обработки. . . . .	13
I.3. Проблемы адаптации фрезерования маложестких заготовок по динамическим параметрам обработки. . . . .	25
I.4. Цель и задачи исследования. . . . .	31
2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ МАЛОЖЕСТКИХ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК . . . . .	33
2.1. Исследование статических параметров элементов технологической системы . . . . .	33
2.1.1. Построение матрицы жесткости заготовки. . . . .	33
2.1.2. Упругие характеристики режущего инструмента. . . . .	43
2.1.3. Упругие характеристики системы крепления маложесткой сложнопрофильной заготовки и режущего инструмента на станке. . . . .	51
2.1.4. Формирование вектора силовых параметров . . . . .	56
2.1.5. Формирование вектора деформации в комплексной упругой технологической системе . . . . .	65

2.2.	Исследование динамических параметров при фрезеровании маложестких сложно-профильных заготовок. . . . .	70
2.2.1.	Построение матрицы инерции и определение собственных частот и форм колебаний заготовки и режущего инструмента . . . . .	70
2.2.2.	Математическая модель неконсервативной упругой технологической системы в процессе резания . . . . .	75
2.3.	Выводы. . . . .	93
3.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ МАЛОЖЕСТКИХ ЗАГОТОВОК. . . . .	96
3.1.	Тестирование основных программных алгоритмов. . . . .	96
3.2.	Экспериментальное исследование жесткости турбинных лопаток . . . . .	99
3.3.	Экспериментальное исследование жесткости концевых фрез . . . . .	105
3.4.	Экспериментальное исследование динамических параметров при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок. . . . .	112
3.4.1.	Описание экспериментального стенда и расчет его параметров. . . . .	112
3.4.2.	Результаты экспериментального исследования двухчастотной динамической модели. . . . .	120
3.5.	Выводы. . . . .	128
4.	ПРОГРАММНАЯ АДАПТАЦИЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ МАЛОЖЕСТКИХ ЗАГОТОВОК ПО СТАТИЧЕСКИМ И ДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ . . . . .	129
4.1.	Постановка задачи программной адаптации . . . . .	129
4.2.	Алгоритм программной адаптации при фрезеровании маложестких заготовок. . . . .	135

4.3. Техничко-экономическое обоснование эффективности программной адаптации по статическим и динамическим пара- метрам при фрезеровании маложестких заготовок . . . . .	I40
4.3.1. Выбор базы для сравнения и усло- вия сопоставимости вариантов . . . . .	I40
4.3.2. Техничко-экономический расчет фрезерования турбинных лопаток на станках с ЧПУ . . . . .	I41
4.4. Выводы. . . . .	I48
О С Н О В Н Ы Е   В Ы В О Д Ы . . . . .	I49
ЛИТЕРАТУРА . . . . .	I52
ПРИЛОЖЕНИЯ . . . . .	I65

## В В Е Д Е Н И Е

Решениями XXУП съезда КПСС и основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986–1990 годы и на период до 2000 года перед народным хозяйством поставлена задача наиболее эффективного использования производственного потенциала, получения наивысшей отдачи от вкладываемых в производство средств, а также повышение производительности труда в два раза [1,3], что является решающим условием дальнейшего развития производства и подъема благосостояния народа. Ускорение научно-технического прогресса неразрывно связано с проведением в жизнь мероприятий территориально-отраслевой программы "Интенсификация-90" [2], которая должна обеспечить прирост производительности труда в машиностроении не менее чем на 5 % в среднем за год, снижение себестоимости основных видов продукции на 5–7 %, прирост объема продукции без дополнительного привлечения трудовых ресурсов.

В современном машиностроении, особенно в энергомашиностроении, судостроении, авиастроении значительный объем занимает обработка маложестких сложнопрофильных деталей, таких как рабочие и направляющие лопатки паровых, газовых турбин и компрессоров, гребные винты, крыльчатки и другие аналогичные детали. В энергомашиностроении, например, трудоемкость изготовления таких деталей достигает 45 % от общего объема [12, 84]. Обеспечение заданных размеров, формы и взаимного расположения поверхностей достигается обработкой заготовок резанием. Не смотря на многообразие методов формообразования криволинейных поверхностей, наибольшее распространение получило фрезерование продольными и поперечными строчками на станках

с ЧПУ. При многокоординатном фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок, например турбинных лопаток, непрерывно меняются основные параметры процесса резания (скорость резания, толщина среза, взаимное расположение режущего инструмента и заготовки), упруго-инерционные параметры технологической системы и др. В настоящее время при проектировании обработки маложестких сложнопрофильных заготовок, как правило, влияние упругой динамической системы на процесс формообразования при резании учитывается весьма приближенно. На практике обработка данных деталей производится в основном без учета этого фактора, т.е. режимы фрезерования, заданные в управляющей программе, выбираются, как правило, по общемашиностроительным нормативам режимов резания или из практического опыта без детального учета экономических факторов, точности обработки, качества обрабатываемой поверхности. Следствием этого является неполное использование возможностей станков с ЧПУ по управлению процессом резания, что определяет резерв существенного повышения производительности труда за счет адаптации обработки на этапе проектирования с учетом особенностей взаимодействия элементов упругой динамической системы. Задача использования данного резерва в реальных условиях обработки при жестких ограничениях на точность размеров и формы маложестких сложнопрофильных деталей является актуальной.

Данная работа посвящена разработке эффективных методов повышения производительности станков с ЧПУ при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок на основе программной адаптации обработки.

Научная новизна. Разработана обоснованная динамическая модель технологической системы при фрезеровании маложестких

сложнопрофильных заготовок типа турбинных лопаток в качестве основы для выполнения комплекса исследований динамической точности и выбора эффективных методов повышения производительности механической обработки.

На базе предложенной динамической модели создана система программной адаптации фрезерования маложестких сложнопрофильных заготовок, позволяющая на этапе проектирования механической обработки учесть влияние на процесс формообразования при резании основных особенностей упругой динамической системы (многосвязанность модели, обусловленная специфическим взаимодействием элементов технологической системы в процессе обработки маложесткой заготовки; изменяющиеся в процессе обработки упруго-инерционные параметры технологической системы; влияние технологических параметров обработки на условия устойчивости невозмущенного движения системы при резании). Установлены зависимости между деформирующей способностью сил резания и поверхностных остаточных напряжений, а также деформативностью технологической системы в целом.

Практическая ценность и реализация в промышленности. Разработанная система программной адаптации фрезерования маложестких заготовок позволяет обеспечить максимальную производительность обработки при жестких ограничениях на точность размеров и формы изделий. Система реализована в виде пакета программ с широкими диалоговыми возможностями и может быть использована как автономно, так и в составе систем автоматизированного проектирования технологических процессов и систем подготовки управляющих программ.

Результаты работы использованы на ПО Турбостроения "Ленинградский Металлический завод"; ПО "Ленинградский завод тур-

бинных лопаток". Разработанная система программной адаптации обеспечила повышение производительности при обработке турбинных лопаток на 15,3 %, что в пересчете на один станок с ЧПУ дало годовой экономический эффект 9,1 тыс.руб.

Автор защищает:

1. Научно обоснованную динамическую модель технологической системы при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок.

2. Зависимости для определения упруго-инерционных характеристик технологической системы при фрезеровании маложестких заготовок.

3. Зависимости между деформирующей способностью сил резания и поверхностных остаточных напряжений, а также деформативностью в технологической системе.

4. Алгоритм анализа устойчивости технологической системы при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок с возможностью варьирования различных технологических параметров.

5. Экспериментальные данные по исследованию статических и динамических характеристик технологической системы.

6. Систему программной адаптации фрезерования маложестких заготовок.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на научных семинарах кафедр "Гибкие автоматические комплексы" ЛПИ им. М.И.Калинина, "Теоретическая механика" завода-втуза при ПО "ЛМЗ", Межвузовской лаборатории "Динамика и управление в оборудовании ГПС", на краткосрочных семинарах в ЛДНТП в 1982-1987 гг., на Республиканской научно-технической конференции по автоматизации проектирования технологии и программированию обработки сложных поверхностей на станках с ЧПУ (г. Киев, 1982



г.), на зональной научно-технической конференции по повышению эффективности и производительности использования технологического оборудования (г. Андропов, 1982 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы обработки деталей машиностроения на станках с ЧПУ" (г. Свердловск, 1983 г.), на Всесоюзном семинаре "Методы и средства вибродиагностики конструкций машин и механизмов" (г. Каунас, 1983 г.), на III Всесоюзном совещании по роботизированным технологическим системам (г. Воронеж, 1984 г.), на Всесоюзном научном семинаре "Актуальные проблемы прикладной механики" (Ленинградский дом ученых им. М. Горького, 1986 г.), на всесоюзном семинаре "Промышленные роботы и гибкие автоматизированные производства" (г. Москва, 1986 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ.

Автор считает своим долгом выразить искреннюю благодарность научному руководителю работы доктору технических наук, профессору Вейцу В.Л., д.т.н., профессору Шевелеву Л.П., к.т.н., старшему научному сотруднику Хитрику В.Э., к.т.н., доценту Шмакову В.А., а также всему коллективу кафедры "Теоретическая механика" завода-втуза за помощь в работе.

## I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### I.I. Анализ возможностей повышения эффективности использования станков с ЧПУ при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок

Опыт использования станков с ЧПУ при фрезеровании таких маложестких заготовок, как рабочие и направляющие лопатки паровых и газовых турбин, гребные винты, лопасти гидравлических турбин и летательных аппаратов, а также других маложестких сложнопрофильных изделий [12], показал высокую эффективность по сравнению с универсальным оборудованием. Эффективность станков с ЧПУ по отечественным и зарубежным данным характеризуется ростом производительности, числом заменяемых универсальных станков, сокращением сроков подготовки производства и технологической оснастки, уменьшением брака, сокращением разметочных и слесарно-подгоночных работ, внедрением с начала запуска нового изделия расчетно-технических норм и обеспечением тем самым существенного уменьшения трудоемкости и повышения производительности труда [108].

Эффективность использования станков с ЧПУ при обработке маложестких сложнопрофильных заготовок может быть определена показателями экономического, технического и организационного характера [28,81]. В настоящее время из числа этих показателей одним из основных является повышение производительности обработки [1,2,3,49]. Повышение производительности обработки обеспечивается за счет возможности: назначения оптимальной траектории движения режущего инструмента, выбора периодической подачи, оптимальной по величине и направлению; изменения

скорости рабочей подачи в соответствии с изменением припуска и условий фрезерования в каждом кадре управляющей программы [16,107]. Так, при обработке рабочего профиля лопаток паровых турбин цилиндров высокого и среднего давления с переменными режимами резания на станках с ЧПУ машинное время снижается в среднем на 20 % [108,113]. При этом стойкость режущего инструмента не снижается, а точность обработки профиля повышается.

Расширенные функциональные возможности адаптации обработки маложестких заготовок обеспечивают системы управления станками типа CNC [107]. Они позволяют осуществлять коррекцию на размеры инструментов, логическое управление, коррекцию погрешностей механических и измерительных приборов, адаптивное управление механообработкой, накопление статистической информации, автоматический встроенный контроль, ввод и хранение системного программного обеспечения и др. [85].

При фрезеровании маложесткой заготовки одним из сдерживающих производительность обработки факторов является высокая податливость элементов технологической системы. Существенным здесь является то, податливость меняется в зависимости от относительного положения инструмента и заготовки, а также в зависимости от снятого в ходе обработки слоя металла. Адаптация управляющих программ с учетом податливости позволяет обеспечить требуемую точность обработки при максимальной производительности. Широкие возможности адаптивного управления с помощью современных систем управления 2С42, Сфера-36, Размер-4, НЦ-31 и др. позволяют осуществлять гибкую программную адаптацию по переменности припуска заготовок, по выбору режимов, обеспечивающих устойчивость технологической системы

при резании.

Эффективность использования станков с ЧПУ при обработке сложнопрофильных маложестких заготовок в значительной степени определяется выбором режущего инструмента. Так, концевые фрезы по сравнению с профильными и острозаточными фрезами [66] обладают большей универсальностью и позволяют производить обработку поверхностей различной сложности [78]. К тому же они достаточно дешевы и не требуют сложной заточки. Их применение при обработке фасонных поверхностей позволяет: сократить количество управляемых координат, необходимое для формообразования, и, тем самым, вести обработку сложных поверхностей на 3-4-х координатных станках с ЧПУ; изменить имеющееся координатное перемещение станка на более рациональное с точки зрения процесса формообразования поверхности; упростить конструктивную компоновку станка; повысить производительность формообразования; упростить процесс программирования сложной поверхности [93,94,113]. При использовании концевых фрез необходимо в каждом кадре управляющей программы осуществлять дополнительную программную адаптацию по податливости режущего инструмента. Однако, в силу гибкости программной адаптации это усложнение является несущественным.

В результате выше изложенного можно сказать, что повышения эффективности станков с ЧПУ при фрезеровании маложестких заготовок можно добиться без дополнительных капитальных вложений в новую технику, а за счет программной адаптации обработки по статическим и динамическим параметрам на базовом оборудовании с ЧПУ. Она включает в себя управление механической обработкой маложестких заготовок путем включения в каждый кадр управляющей программы расчетных рациональных режимов резания,

обеспечивающих такие условия взаимодействия режущего инструмента и заготовки, которые позволят добиться максимальной производительности обработки.

## 1.2. Проблемы адаптации фрезерования маложестких заготовок по статическим параметрам обработки

При фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок отклонения полученных размеров профиля от теоретического могут достигать значительных размеров. Так, в результате фрезерования профиля лопаток паровых турбин последних ступеней цилиндров низкого давления (ЦНД) отклонения профиля от теоретического могут достигать 3–4 мм [12,19,44,68]. Эти отклонения вызваны, в основном, следующими погрешностями механической обработки систематического и квазисистематического характера [60,77]: связанными с неточностью металлорежущего станка; связанными с износом режущего инструмента; вызванными упругими деформациями элементов технологической системы; вызванными остаточными деформациями профиля после обработки; связанными с переменной погрешностью припуска заготовок; погрешностями базирования и др. Определяющим в формировании перечисленных поверхностей являются особенности взаимодействия режущего инструмента и заготовки. Типичным представителем маложестких сложнопрофильных деталей машин является турбинная лопатка. Она включает в себя характерные особенности удлиненных маложестких сложнопрофильных деталей. Поэтому в дальнейшем рассмотрении ограничимся исследованием турбинных лопаток как объекта механической обработки.

Некоторые из указанных выше погрешностей применительно к

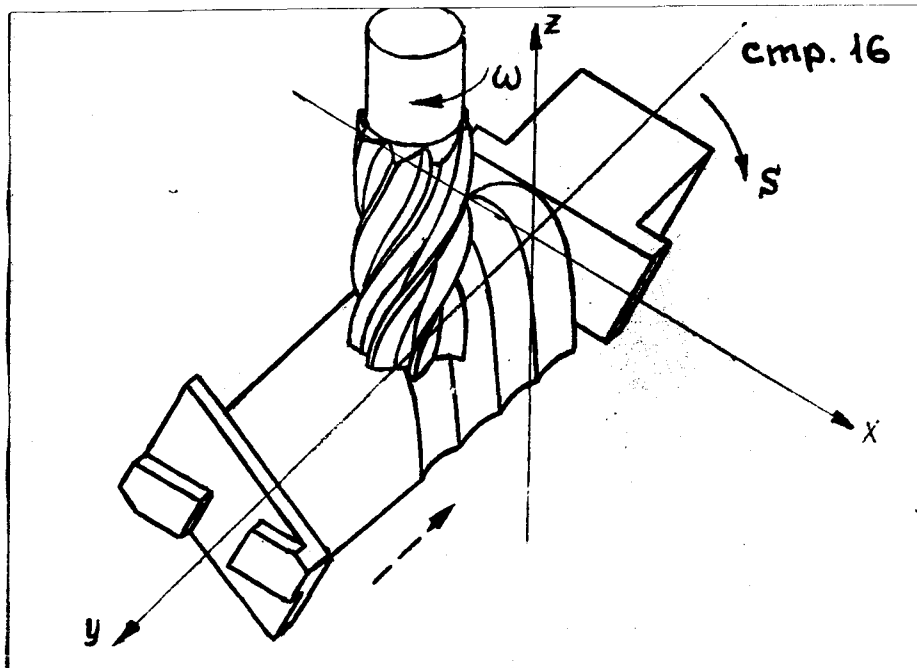
обработке маложестких сложнопрофильных заготовок исследованы в настоящее время достаточно полно. Так, погрешности, вызванные неточностями и податливостью металлорежущего станка, можно оценить и учесть, используя стандартные методики [7,100]. Получив экспериментальные данные о балансе деформаций в станке, можно рассчитать коэффициенты жесткости в системе координат станка, приведенные к зоне резания. Эти данные необходимо учитывать при формировании упругих характеристик технологической системы.

Погрешности, связанные с неточностью и износом режущего инструмента достаточно широко исследованы различными авторами [46,96,106]. В частности, вопросы износа при фрезеровании концевыми фрезами труднообрабатываемых сталей и сплавов также достаточно полно исследованы [39,77,92,93], а в работе [38] приведена подсистема оптимизации режимов резания по критерию износа режущего инструмента.

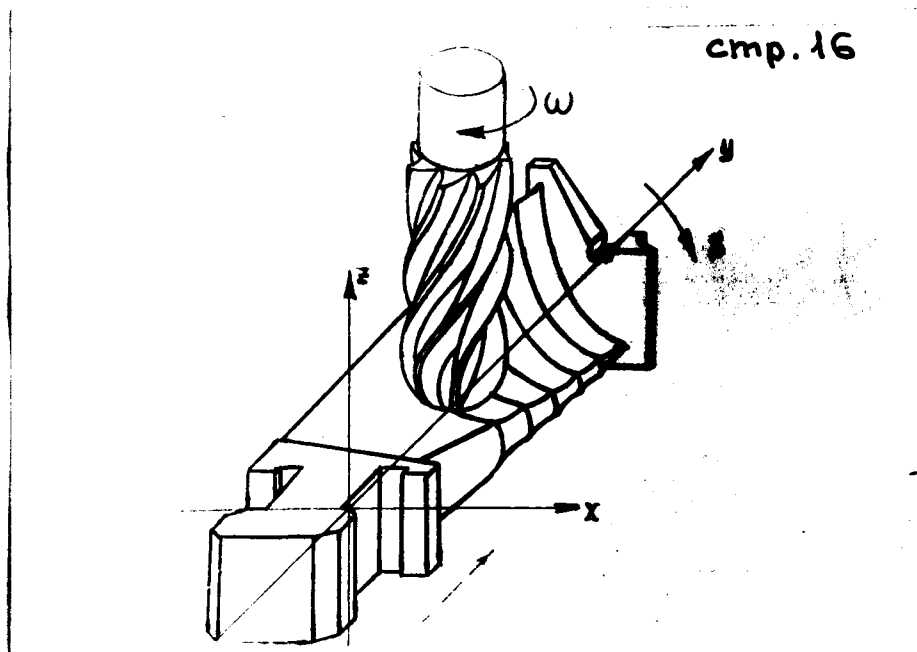
При различных условиях взаимодействия режущего инструмента и маложесткой заготовки появляются погрешности, вызванные податливостью элементов технологической системы. Рассмотрим особенности концевой фрезерования профильной части турбинной лопатки. Здесь в состав технологической системы входят лопатка, фреза, которые связаны со станком системой крепления. Жесткость наиболее податливого элемента - лопатки колеблется в значительных пределах, от 800 до 4000 Н/мм [13]. Если рассмотреть баланс деформаций между элементами технологической системы, то он составляет: лопатка - 50-70 %, фреза - 25-35 %, система крепления - 10-20 % [68,77,103]. Это позволяет выделить систему лопатки в качестве доминирующей.

Соотношение размеров и формы лопатки дают основание

представить ее в виде тонкостенного закрученного стержня [14]. Однако у лопаток последних ступеней ЦНД в сечениях, близких к головным, со стороны выходной кромки появляются оболочечные эффекты [34]. Основы методов расчета закрученных стержней, в частности турбинных лопаток, были заложены в работах В.З.Власова [25], и Г.Ю.Джанелидзе [33,35]. Широкое продолжение они получили в работах Б.Ф.Шорра и Ю.С.Воробьева [26,27,119], а также других авторов. Однако, механическая обработка профиля турбинной лопатки, как и любой маложесткой заготовки, имеет свои особенности. Они заключаются в том, что при фрезеровании осуществляется значительный съем припуска, причем последовательность съема металла определяется ходом технологического процесса (рис. 1.1). Так, например, возможна такая последовательность обработки: обработка галтельных переходов со стороны головной и хвостовой частей, а затем обработка профиля в выбранном направлении. Так как величина снимаемого припуска составляет 3-6 мм, то такой съем в значительной степени оказывает влияние на деформативные характеристики лопатки. Решение задачи в такой постановке с использованием указанных выше алгоритмов становится затруднительным, так как профиль лопатки имеет участки с резким изменением геометрических характеристик. По длине профиля эти характеристики меняются в ходе обработки. Задача усложняется еще и тем, что на модель необходимо накладывать граничные условия, характер которых определяется способом крепления лопатки в станочном приспособлении. К тому же необходимо учитывать особенности процесса фрезерования профильной части лопатки. При этом возникают силы резания при обработке и остаточные напряжения в поверхностном слое обработанной поверхности, которые существен-



a)



б)

Рис. I.I. Особенности фрезерования профильной части турбинных лопаток.



но зависят от условий взаимодействия режущего инструмента и заготовки и должны быть учтены в дискретной модели.

Опыт расчета подобных конструкций уже имеется [76, 114]. В этих работах в качестве расчетного метода была принята стержневая теория метода конечных элементов [45, 102, 104]. Использование данного метода дает возможность автоматически обеспечить условие совместности деформаций в узлах модели, а также формализованно учитывать необходимое число граничных условий. Эта теория разработана достаточно полно для решения широкого класса задач деформации стержневых систем [98, 99]. Однако, область применения данных алгоритмов ограничивается стержнями, имеющими одну или две оси симметрии поперечного сечения и малый угол закрутки. Для обжего случая деформации закрученных тонкостенных стержней, в частности турбинной лопатки, упомянутые алгоритмы содержат в себе погрешность, источник которой связан с принятием классической теории Кирхгофа-Клебша. Согласно этой теории матрица упругости, связывающая кинематические и силовые характеристики деформации, содержит отличными от нуля только диагональные элементы, а сами зависимости распадаются на независимые уравнения того же вида, что и для незакрученных стержней. Эта теория была положена в основу расчета деформаций турбинных лопаток в работе [76].

Так как угол закрутки рабочего профиля лопатки достигает 60-70 градусов, а поперечное сечение является несимметричным и его хорда на порядок и более превышает максимальную толщину (рис. 1.1), то необходимо разработать такой алгоритм расчета деформаций турбинной лопатки, чтобы можно было учесть все ее особенности.

При фрезеровании профиля турбинной лопатки используются

в основном концевые фрезы. Так как фреза является элементом технологической системы, для комплексного расчета необходимо иметь расчетные данные о податливости фрезы в зависимости от условий взаимодействия ее с заготовкой. Расчет деформаций концевых фрез также представляет определенные трудности ввиду сложности их геометрии. Особо здесь можно отметить сложность определения геометрических характеристик поперечных сечений рабочей части фрезы. В настоящее время известен ряд методов исследования жесткости концевых фрез. Для быстрого определения геометрических характеристик поперечных сечений фрез используют упрощенные эмпирические формулы [9,47]. Однако применение данного метода ограничено тем, что он не учитывает ряда геометрических факторов, таких как высота и форма зубьев фрезы. К тому же эти зависимости носят эмпирический характер и не могут быть обобщены на различные фрезы. Метод аналитического расчета жесткости концевых фрез, основанный на рассмотрении их в виде закрученных стержней [55,56], позволяет учитывать угол наклона винтовой канавки зубьев. Однако он не учитывает такие важные факторы, как наличие переходных участков (рабочая и нерабочая части), возможность использования конических рабочих частей, а также ограничен тем, что позволяет производить расчет деформаций только от действия продольной силы и крутящего момента. Графоаналитический метод расчета жесткости концевых фрез [58,124] позволяет учитывать наличие переходных участков. Однако данный метод имеет низкую точность и плохо алгоритмируется, а также не учитывает угол наклона зубьев фрезы. Метод расчета жесткости концевых фрез [109], основанный на представлении поперечных сечений в виде совокупности упрощенных геометрических элементов, обеспечивает расчет

с учетом угла наклона режущей кромки. Однако поперечные сечения для расчета геометрических характеристик выбраны искусственно, к тому же не учитывается наличие переходных участков и коническая рабочая часть фрезы.

Из рассмотренных выше работ следует, что существующие методы расчета жесткости концевых фрез и их геометрических характеристик не являются универсальными, плохо алгоритмируются, имеют различные ограничения. Необходим метод расчета, который мог бы быть применен для различных видов и типоразмеров концевых фрез.

Вопросы расчета собственной жесткости элементов станочных приспособлений изучены достаточно полно [4,73,74,82,118]. Однако, учет данного параметра в расчетной модели турбинной лопатки в настоящее время не осуществляется в полной мере. Так, в работе [76] авторы предлагали считать элементы крепления лопатки или шарнирами, или жесткими заделками. В конечноэлементных постановках, как правило, обобщенные координаты, на которые накладываются ограничения, исключаются [29,99,102,104]. В работе [114] была сделана попытка учесть податливость системы крепления лопатки, однако здесь ограничения накладывались на заготовки в целом как на недеформируемое твердое тело, при этом ограничены возможности учета крутильных податливостей элементов системы крепления. Это вносит существенную погрешность в результаты расчета.

В результате обработки профиля турбинной лопатки в ее поверхностный слой вносятся остаточные напряжения, которые значительно деформируют профиль (до 2-4 мм) [59,69,89,116]. Они существенно зависят от условий взаимодействия фрезы и заготовки, а также от выбора режимов механической обработки. Ис-

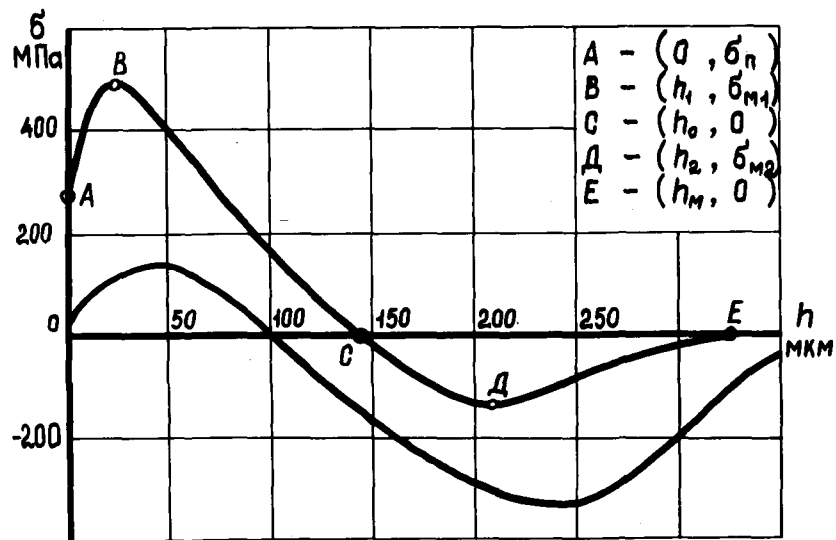
следованию поверхностных остаточных напряжений посвящено большое число работ у нас в стране и за рубежом [8,50,51,68,70,79,89,121]. Однако в выборе критериальных значений остаточных напряжений нет общей точки зрения. Так, усредненная эпюра технологических остаточных напряжений в профильной части турбинной лопатки после фрезерования [79] может иметь до пяти особых точек (точки А, В, С, Д, Е на рис. 1.2). Однако применение в расчетной практике одного из этих критериальных значений не может полностью охарактеризовать всей эпюры. Наиболее целесообразно для расчета остаточных деформаций применить интегральную величину  $q^*$ , которая характеризует деформирующую способность технологических остаточных напряжений, внесенных в поверхностный слой заготовки механической обработкой [48]

$$q^* = \int_0^{h_m} \sigma dh, \quad h_m = \max h \quad (1.1)$$

где  $\sigma$  — величина остаточных напряжений;  $h_m$  — максимальная глубина залегания остаточных напряжений.

Существуют известные алгоритмы учета остаточных напряжений и их влияния на деформирующую способность и деформативность рабочего профиля турбинной лопатки [8,50,69,70,79,89,90]. В этих работах предпринят единый подход к расчету остаточных деформаций. Модель лопатки представлена в виде призматического закрученного стержня. В основу расчета принята обобщенная теория Бернулли-Эйлера. Однако принятие этой теории к расчету деформации закрученных лопаток переменного поперечного сечения имеет погрешности, указанные выше. К тому же в этих работах рассмотрены остаточные деформации лопатки, закрепленной

стр. 21



I.2. Распределение остаточных напряжений по глубине залегания в поверхностном слое заготовки при круговом фрезеровании концевой фрезой профильной части турбинной лопатки.

консольно, т.е. уже обработанной. Но остаточные деформации могут проявляться непосредственно в ходе обработки лопатки, особенно последних ступеней ЦНД. Это вносит дополнительные погрешности в результаты обработки.

Существенное влияние на формирование процесса резания при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок оказывает величина припуска на обработку. Заготовки турбинных лопаток, как правило, получают методом горячей штамповки [12, 19, 84]. Припуски под последующую обработку, допуски и кузнечные напуски на штампованные заготовки рабочих и направляющих лопаток паровых и газовых турбин устанавливаются соответствующими отраслевыми стандартами. Рассмотрим особенности формирования припусков у заготовок турбинных лопаток на примере рабочей лопатки 20 ступени паровой турбины К-200 [12]. Условно припуск формируется эквидистантно и равен  $\delta = 5$  мм. Однако действительные размеры необходимо брать с учетом всех необходимых допусков

$$\delta_g = \delta \pm \sum_{k=1}^{k=4} \Delta_k, \quad (1.2)$$

где  $\Delta_1$  - допуск на размер (1,5+2 мм);  $\Delta_2$  - допуск на поперечное смещение верхнего и нижнего штампов (1+1,5 мм);  $\Delta_3$  - допуск на поперечное смещение штампов (1+1,5 мм);  $\Delta_4$  - допуск на недоштамповку (1 мм).

В соответствии с (1.2) техническими условиями на изготовление лопатки допускается колебание припуска 3,5 мм. Здесь необходимо учесть также и такие факторы, как кузнечные напуски и износ штампов в процессе работы. В результате получается, что припуск у реальной лопатки при наличии средних значений

перечисленных погрешностей имеет переменность порядка 50–80 % от среднего значения припуска [77]. По данным предприятий энергомашиностроения припуски заготовок турбинных лопаток колеблются от 3 до 6 мм [12], причем перераспределение припуска вдоль продольной оси заготовки носит квазисистематический характер. Такая переменность припуска существенно усложняет процесс фрезерования заготовок, поэтому необходимо искать пути устранения данной проблемы. В последнее время многие авторы предлагают на этапе проектирования технологического процесса и создания управляющей программы для станка с ЧПУ задаваться наиболее рациональными режимами резания при обработке мало жестких сложнопрофильных заготовок, полученными расчетным путем. Такое управление обработкой позволяет повысить производительность станка при обеспечении требуемой точности. Однако, для этого необходимо задаться каким-то припуском, т.е. формализованно представить геометрию сложнопрофильной заготовки. Ряд авторов предложили описывать поверхности, подобные лопаточным, объемными элементами такими, как плоскости, цилиндрические и конические поверхности [61, 113]. Другие авторы рассмотрели лопатку как набор цилиндрических поверхностей различных диаметров [92, 93]. Недостатком всех этих подходов является то, что припуск является эквидистантным по отношению к теоретическому профилю, не меняется вдоль продольной оси заготовки и не дается никаких рекомендаций по учету переменности припуска, т.е. изменению этой эквидистанты. В результате силы и режимы резания, рассчитанные по этим методикам, могут на 50–100 % отличаться от реальных.

Исследования [19, 44] показали, что изменение припуска для различных заготовок лопаток в партии носит случайный ха-

рактар и не поддается описанию зависимостями, объединяющими заготовки всей партии. Однако у отдельно взятой заготовки припуск меняется монотонно и, как правило, увеличивается от хвостовой части к головной и перераспределение припуска носит квазисистематический характер. В настоящее время для снижения переменности припуска на предприятиях энергомашиностроения широко применяются станки для обработки базовых поверхностей лопаток с устройствами автоматической выверки рабочего профиля моделей СМ-160, СМ-879, СМ-939 [117]. Обработка на них 500 заготовок лопаток длиной 950 мм позволила уменьшить переменность припуска с 3-6 мм до 0,8-1,2 мм. Ориентация заготовки осуществляется по трем сечениям следующим образом [77]. Заготовка устанавливается искусственными черновыми базами на століке механизма ориентации станка. К штампованному рабочему профилю лопатки подводится 20 ошупывающих датчиков. В результате ориентации заготовка занимает теоретически правильное положение, после чего осуществляется обработка базовых поверхностей. В результате измерения вычислитель станка выдает информацию о среднем значении припуска  $\delta_i$  в каждом из трех контролируемых сечений, а также среднее значение припуска для всей лопатки  $\delta_{ср}$ . Использование автоматов выверки заготовок позволяет существенно повысить точность расчетов при исследовании процесса резания. Однако, не смотря на то, что переменность припуска резко снижается, перераспределение его вдоль продольной оси остается. Это в свою очередь сказывается на упругих характеристиках обрабатываемой заготовки. Необходимо в предварительных расчетах учитывать это перераспределение.

В настоящее время наиболее точным считается измерение лопаток при помощи координатно-измерительных машин [53]. Одна-



ко, технология измерения лопаток в них построена таким образом, что осуществляется обход датчиком профиля лопатки круговым методом [ 42 ]. В результате необходимо измерять профиль лопатки в каждом контролируемом сечении. Эта операция является длительной, а информация о сечении неполной, так как отсутствуют данные о заготовке между сечениями.

Таким образом, для повышения производительности станков с ЧПУ и обеспечения требуемой точности фрезерования маложестких сложнопрофильных заготовок необходимо обеспечить адаптацию обработки с учетом податливости элементов технологической системы и перераспределения припуска заготовок – основных факторов, влияющих на статические параметры обработки. При этом необходимо корректно учесть влияние особенностей процесса резания на взаимодействие режущего инструмента и маложесткой заготовки, разработать такую расчетную модель, которая позволила бы связать деформативность в технологической системе с особенностями процесса резания.

### 1.3. Проблемы адаптации фрезерования маложестких заготовок по динамическим параметрам обработки

Вопросы динамики процесса механической обработки маложестких сложнопрофильных заготовок, в частности турбинных лопаток, в настоящее время являются весьма актуальными в связи с широким внедрением для выполнения данной операции станков с ЧПУ. В условиях безлюдной технологии необходимо добиваться высокой производительности станков с ЧПУ при обеспечении требуемой точности обработки и динамического качества изготовления маложестких заготовок. При этом необходимо решать такие вопро-

сы динамического характера, как взаимодействие упругой системы заготовки (турбинной лопатки), режущего инструмента (концевой фрезы) и станка, учет диссипативных факторов, выбор динамической характеристики процесса фрезерования и др.

При фрезеровании турбинных лопаток могут возникать различные виды колебаний: вынужденные колебания, автоколебания, а также сложные колебательные режимы (захватывания, асинхронного возбуждения и др.) [86,123]. Так как лопатка в технологической системе, как правило, имеет малую жесткость [13], необходимо знать ее собственные частоты и формы колебаний с учетом таких технологических особенностей, как способ крепления заготовки лопатки на станке и текущее состояние ее в ходе обработки, т.е. количество снятого припуска. В ходе обработки происходит последовательный сьем припуска. Это ведет к изменению упругих и инерционных характеристик заготовки и, как следствие, к изменению собственных частот колебаний. Вопросам исследования собственных частот и форм колебаний в энергетических машинах посвящены работы советских ученых В.Л.Бирдермана [14,15], В.Л.Вейца [21,22,20,91], А.П.Филиппова [115] и др. Вопросам определения собственных частот и форм колебаний турбинных лопаток посвящены работы А.В.Левина [72], К.Н.Боршанского [56,17], Ю.С.Воробьева [18,26], Б.Ф.Шорра [26,119] и др.

Для исследования колебаний лопатки существует две формы ее представления: в виде оболочки и естественнозакрученного тонкостенного стержня. В работах [32,52,72] принят метод конечных элементов, причем лопатка представлена в виде закрученной оболочки переменной толщины. Дискретная схема лопатки строится с применением однослойных криволинейных конечных элемен-

тов. К достоинствам данного метода можно отнести то, что он не требует аналитического представления геометрической формы лопатки, а также учитывает оболочечные эффекты, которые проявляются у лопаток последних ступеней ЦНД. Однако при решении технологических задач данный метод имеет ряд ограничений. Во-первых, это комплексный пакет программ, для реализации которого необходима ЭВМ высокой мощности. Во-вторых, необходимо большое количество времени для формирования и ввода исходной информации. В-третьих, так как в реальных условиях происходит последовательный съем металла, необходимо периодически осуществлять пересчет, а для этого надо менять исходную информацию. В работах [26,72] рассмотрена также схематизация турбинной лопатки в виде тонкостенного закрученного стержня с распределенными параметрами. Данный подход является упрощенным по сравнению с рассмотренным выше, однако позволяет получать реальные результаты. Для учета особенностей обработки лопаток данный метод целесообразно дополнить конечно-элементной реализацией. В результате можно разработать алгоритм, позволяющий осуществить реализацию с высоким быстродействием на малых ЭВМ и при этом возможные изменения данных незначительны. Если учесть, что для подготовки одной управляющей программы необходимо выполнить около 200 реализаций с изменениями исходных данных после каждой реализации, то можно сказать, что данный подход при решении поставленной задачи является наиболее целесообразным. При этом погрешность расчета допустима для практических расчетов при решении технологических задач.

Исследованию вынужденных колебаний в турбинных лопатках посвящено большое число работ [20,26,36]. Так как станочные системы являются малодемпфированными [20,67,97], то условие

по главным формам колебаний нежелательны. При этом необходимо, чтобы зубцовая частота фрезы не была кратной частотам одной из этих форм колебаний и отличалась от них, по крайней мере, на 15–20 %. В случае, когда это сделать затруднительно, необходимо проанализировать динамическое качество обработанной поверхности (шероховатость, волнистость).

С целью выбора динамической характеристики фрезерования рассмотрим основные существующие гипотезы возникновения автоколебаний при механической обработке. В работах А.И.Каширина [54], Л.С.Мурашкина, С.Л.Мурашкина [86,87], [131] в качестве основного механизма возбуждения автоколебаний при резании выдвинуто представление о нелинейной падающей зависимости силы резания от скорости скольжения стружки о резец. Это представление было установлено одним из первых для объяснения автоколебаний станков при резании. Механизм возбуждения автоколебаний за счет наличия координатной связи в упругих контурах был рассмотрен в работах И.Тлустого [112] и В.А.Кудинова [67]. И.Тлустый ввел понятие координатной связи, однако в качестве описания процесса резания им была принята статическая характеристика резания, которая не может в полной мере объяснить условия возникновения автоколебаний. В.А.Кудинов ввел динамическую характеристику резания, которая определяла фазовый сдвиг между изменением координаты, в частности толщины срезаемого слоя, и изменением силы резания, причем величина этого фазового сдвига определялась с помощью постоянной стружкообразования. Примерно к таким же результатам, но с других позиций, пришел в своих работах М.Е.Эльясберг [120, 121]. Он установил, что появление возмущения в упругой системе должно повести к изменению состояния деформированной зоны

и к соответствующему изменению сил резания. Это изменение не может распространяться мгновенно на всю зону, что вызывает запаздывание в изменении силы. Автоколебания возникают в результате наличия запаздывающих сил, раскачивающих систему. Им были экспериментально получены постоянные запаздывания для различных материалов [122]. В ряде работ, в частности в работах И.Г.Жаркова [41] выдвинуто предположение о том, что проме запаздывания при фрезеровании источником возбуждения автоколебаний является работа по следу, осуществленному предыдущим зубом на поверхности резания.

Как показали исследования И.Г.Жаркова, В.Л.Заковоротного, А.И.Каширина, Л.С.Мурашкина, С.Л.Мурашкина, В.А.Кудинова, М.Е.Эльясберга, I. Tlustý, P.E. Guggax и др., оператор резания в динамической модели технологической системы является нелинейным, что требует применения приближенных методов аналитических или качественных методов решения, что осуществимо обычно для систем малой размерности [23]. Для многомерных систем используются в основном численные методы [24]. Поскольку в данной работе не ставится задача исследования автоколебания, а также таких сложных периодических режимов, как захватывание, асинхронное возбуждение и др., необходимо традиционными методами построить и рассмотреть линеаризованную модель, позволяющую исследовать устойчивость системы в малом, по линейному приближению [18]. Приведенные выше гипотезы возбуждения автоколебаний позволяют построить достоверную динамическую характеристику фрезерования. Однако, в силу выбранного математического аппарата для исследования в качестве динамической характеристики фрезерования можно выбрать один из существующих методов описания, т.е. оператор резания в виде линейных аперии-

одических звеньев [101, 134, 137]

$$T_p \dot{P} + P = k x, \quad (1.3)$$

где  $T_p$  - постоянная запаздывания;  $P$  - динамическая сила резания;  $x$  - изменение обобщенной координаты системы;  $k$  - коэффициент возмущения.

Одним из важнейших вопросов в динамике фрезерования турбинных лопаток является учет диссипативных факторов. Так как станочные системы являются малодемпфированными, а влияние диссипации проявляется практически лишь в околорезонансных режимах [23, 72], то для определения коэффициентов диссипации можно принять допущение об отсутствии диссипативных связей между различными формами колебаний [15]. Так как данное допущение позволяет осуществить переход к нормальным координатам, то матрицу демпфирования целесообразно строить именно в нормальных координатах. Она будет иметь отличными от нуля только диагональные элементы, которые для любой нормальной координаты имеют следующий вид [23]

$$b_i = \frac{1}{2\pi} \psi_i \sqrt{c_i m_i}, \quad (1.4)$$

где  $\psi_i$  - коэффициент поглощения в  $i$ -м нормальном контуре (НК);  $c_i$  - коэффициент эсткости в  $i$ -м НК;  $m_i$  - коэффициент инерции в  $i$ -м НК.

В результате выше изложенного можно сказать, что для решения вопросов адаптации фрезерования маложестких заготовок необходимо исследовать динамические характеристики, а также влияние технологических параметров обработки на условия устойчивости невозмущенного движения при резании.

#### I.4. Цель и задачи исследования

Анализ данных отечественной и зарубежной промышленности, а также результаты выполненных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. В настоящее время отсутствуют расчетные методы, позволяющие рассматривать технологическую систему в процессе обработки маложестких сложнопрофильных заготовок как единую упругую динамическую систему с учетом ее специфических особенностей.

2. Недостаточно учитывается влияние на процесс формообразования при резании переменности припуска и поверхностных остаточных напряжений.

3. Управляющие программы обработки маложестких заготовок формируются без учета свойств и особенностей динамической системы.

4. Недостаточно используются возможности систем ЧПУ станков по управлению технологическими параметрами обработки.

5. Недостаточно развиты методы исследования взаимодействия упругой системы с процессом резания при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок.

6. Существует разрыв между исследованиями по резанию и технологическим проектированием обработки маложестких заготовок.

Основной целью данной работы является разработка эффективных методов повышения производительности станков с ЧПУ при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок на основе программной адаптации механической обработки. Для достижения данной цели поставлены следующие задачи исследования:

1. Построение научно обоснованной динамической модели технологической системы при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок и выбор на базе результатов исследования этой модели эффективных методов повышения производительности обработки.

2. Разработка применительно к выбранной модели методов оценки динамических качеств технологической системы при фрезеровании маложестких заготовок с целью обеспечения требуемой точности при максимальной производительности обработки.

3. Выполнение комплекса расчетно-экспериментальных исследований условий формообразования при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок с учетом усилий, возникающих в процессе обработки (сил резания и перераспределения внутренних напряжений).

4. Разработка системы программной адаптации при обработке фрезерованием маложестких сложнопрофильных заготовок на станках с ЧПУ и внедрение разработок в опытно-промышленных условиях.

5. Проведение комплекса экспериментальных исследований статических и динамических характеристик технологической системы при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок с целью обоснования правомерности исходных предположений и работоспособности предложенного программного обеспечения для станков с ЧПУ.



## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ МАЛОЖЕСТКИХ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

### 2.1. Исследование статических параметров элементов технологической системы

Для исследования деформативности в технологической системе необходимо рассмотреть упругие характеристики ее элементов: заготовки (турбинной лопатки), режущего инструмента (концевой фрезы), системы крепления заготовки и режущего инструмента на станке.

#### 2.1.1. Построение матрицы жесткости заготовки

Если рассмотреть маложесткие сложнопрофильные заготовки, то значительное их число составляют рабочие и направляющие лопатки паровых и газовых турбин, лопасти гребных винтов, винтов летательных аппаратов. Характерным представителем этих маложестких заготовок являются рабочие лопатки паровых турбин. Рассмотрим вопросы деформативности маложестких заготовок на примере данных представителей.

Заготовка турбинной лопатки (рис. 2.1) состоит из головной части 1, рабочего профиля 2 и хвостовой части 3. По условию задачи профиль может быть частично обработан. Выделим конечный элемент профиля лопатки длиной  $\alpha$ . Рассмотрим равновесие данного элемента под действием внутренних и внешних сил в форме принципа возможных перемещений [18]

$$\delta U - \delta A = 0 \quad , \quad (2.1)$$

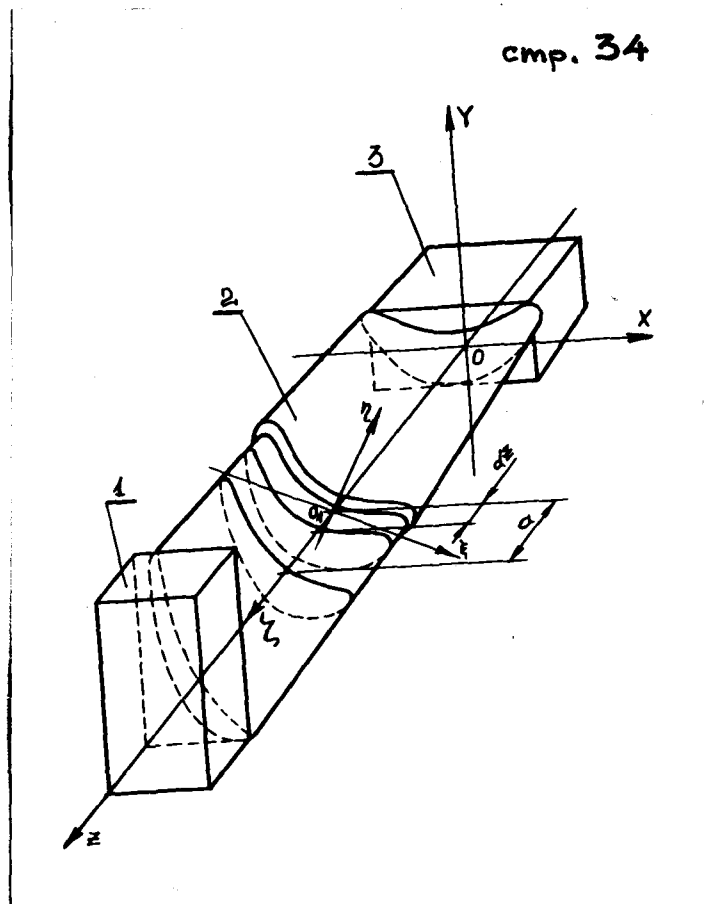


Рис. 2.1. Частично обработанная заготовка турбинной лопатки

где  $\delta U$  - вариация работы внутренних сил;  $\delta A$  - вариация работы внешних сил.

Вариацию работы внутренних сил в рассматриваемом элементе можно записать в виде [33]

$$\delta U = \int_0^a [M_\xi \delta \alpha_\xi + M_\eta \delta \alpha_\eta + M_z \delta \tau + B_\varphi \delta \tau'] dz, \quad (272)$$

где  $M_\xi, M_\eta, M_z$  - внутренние силовые характеристики деформации;  $\alpha_\xi, \alpha_\eta$  - кривизны деформированной оси  $O_1 z$  элемента в плоскостях  $z O_1 \xi$  и  $z O_1 \eta$ ;  $\tau$  - изменение угла закручивания относительно оси  $O_1 z$ ;  $B_\varphi$  - бимомент.

В свою очередь, кинематические характеристики деформации  $\alpha_\xi, \alpha_\eta, \tau, \tau'$  могут быть определены из зависимостей [17]

$$\alpha_\xi = -\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \quad ; \quad \alpha_\eta = \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \quad ; \quad (2.3)$$

$$\tau = \frac{\partial \theta_z}{\partial z} \quad ; \quad \tau' = \frac{\partial^2 \theta_z}{\partial z^2} \quad ,$$

где  $U, V$  - деформации продольной упругой оси в направлении осей  $O_1 \xi, O_1 \eta$ ;  $\theta_z$  - угол поворота в элементе относительно продольной оси  $O_1 z$ .

Выбор законов изменения перемещений  $U, V, \theta_z$  внутри элемента имеет существенное значение, так как это влияет на окончательную точность расчета. Их можно аппроксимировать с достаточной точностью полиномиальными многочленами [29]

$$\begin{aligned} U &= b_1 + b_2 z + b_3 z^2 + b_4 z^3 \quad ; \\ V &= b_5 + b_6 z + b_7 z^2 + b_8 z^3 \quad ; \\ \theta_z &= b_9 + b_{10} z + b_{11} z^2 + b_{12} z^3 \quad , \end{aligned} \quad (2.4)$$

где  $b_1 \dots b_{12}$  - неопределенные коэффициенты полиномов;  $Z$  - текущая координата вдоль оси  $O_1 Z$  внутри элемента.

Рассматриваемый элемент лопатки (рис. 2.2) имеет два узла. В каждом узле необходимо выбрать по возможности минимальное число обобщенных координат. Для обеспечения совместности деформаций между элементами модели в каждом узле введены следующие обобщенные координаты:  $U$ ,  $V$  - перемещения в направлении осей  $O_1 \xi$ ,  $O_1 \eta$ ;  $\theta_\xi$ ,  $\theta_\eta$ ,  $\theta_z$  - углы поворота относительно осей  $O_1 \xi$ ,  $O_1 \eta$ ,  $O_1 Z$ . Перемещение в направлении оси можно не учитывать, так как оно пренебрежимо мало по сравнению с другими. Шестая обобщенная координата  $T$  обеспечивает совместность деформации по деформации поперечного сечения. Таким образом, элемент лопатки, ограниченный двумя узлами, будет иметь 12 обобщенных координат  $q_1, \dots, q_{12}$  (рис. 2.2).

Углы поворота  $\theta_\xi$ ,  $\theta_\eta$ , а также  $T$  можно описать с учетом (2.4)

$$\begin{aligned}\theta_\xi &= -\frac{\partial V}{\partial Z} = -b_6 - 2b_7 Z - 3b_8 Z^2; \\ \theta_\eta &= \frac{\partial U}{\partial Z} = b_2 + 2b_3 Z + 3b_4 Z^2; \\ T &= \frac{\partial \theta_z}{\partial Z} = b_{10} + 2b_{11} Z + 3b_{12} Z^2.\end{aligned}\quad (2.5)$$

Обобщенные координаты  $q_i$  с учетом (2.4) и (2.5) можно выразить через неопределенные коэффициенты

$$q = H \cdot b, \quad (2.6)$$

где  $q$  - вектор-столбец обобщенных координат элемента;  
 $b$  - вектор-столбец неопределенных коэффициентов;  $H$  -  $12 \times 12$

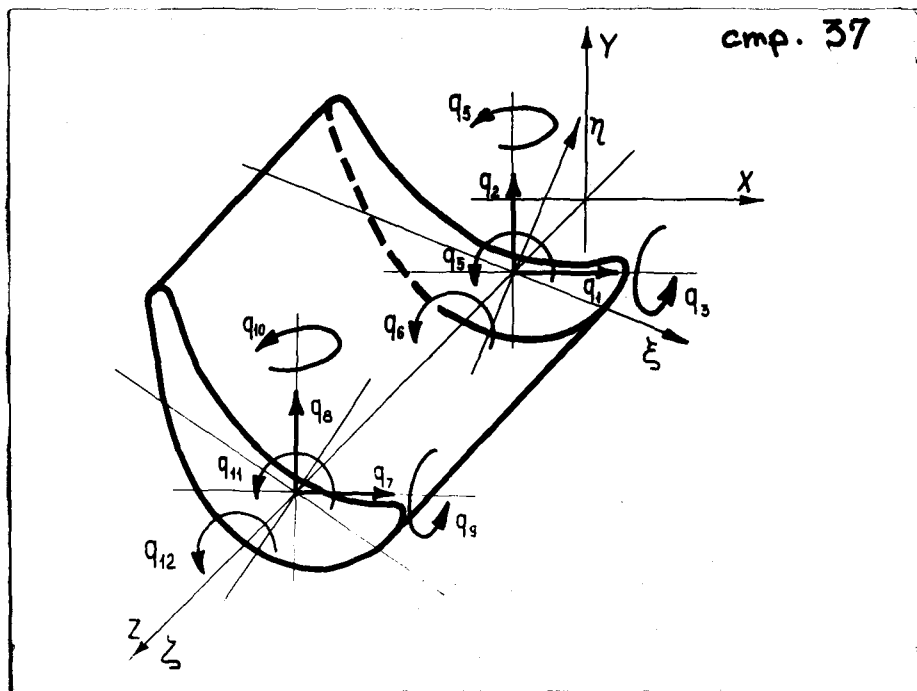


Рис. 2.2. Конечный элемент турбинной лопатки.

матрица коэффициентов формы. С учетом девяти перестановок столбцов она имеет отличными от нуля следующие элементы

$$\begin{aligned} h_{1,1} &= h_{2,2} = -h_{3,3} = h_{4,4} = h_{5,5} = h_{6,6} = h_{7,1} = h_{8,2} = h_{9,3} = \\ &= h_{10,1} = h_{11,5} = h_{12,6} = 1; \quad h_{7,7} = h_{8,8} = h_{11,12} = a^3; \\ h_{7,10} &= h_{8,9} = -h_{9,8}/3 = h_{10,7}/3 = h_{11,11} = h_{12,12}/3 = a^2; \\ h_{7,4} &= h_{8,3} = h_{10,10}/2 = -h_{9,9}/2 = h_{11,6} = h_{12,11}/2 = a. \end{aligned}$$

Запишем выражение потенциальной энергии элемента (2.2) в матричной форме

$$\delta U = \int_0^a \delta \mathfrak{a}^T \cdot M \, dz, \quad (2.7)$$

где  $M$  - вектор-столбец внутренних силовых характеристик деформации,  $M = \{M_\xi \ M_\eta \ M_z \ B_\varphi\}^T$ ;  $\mathfrak{a}$  - вектор-столбец кинематических характеристик деформации,

$$\mathfrak{a} = \{\mathfrak{a}_\xi \ \mathfrak{a}_\eta \ \tau \ \tau'\}^T.$$

Силовые и кинематические характеристики деформации связаны соотношением [26]

$$M = E_1 \cdot \mathfrak{a}, \quad (2.8)$$

где  $E_1$  - 4x4 матрица упругости, которая имеет следующий вид

$$E_1 = \begin{bmatrix} EJ_\xi & 0 & \tau_0 EJ_{\xi r} & EJ_{\eta \varphi} \\ 0 & EJ_\eta & \tau_0 EJ_{\eta r} & \tau_0 EJ_{\xi \varphi} \\ \tau_0 EJ_{r\xi} & \tau_0 EJ_{r\eta} & GJ_k & \tau_0 EJ_{r\varphi} \\ EJ_{\varphi \eta} & \tau_0 EJ_{\varphi \xi} & \tau_0 EJ_{\varphi r} & EJ_\varphi \end{bmatrix},$$

где  $E, G$  - модули упругости I и II рода;  $J_\xi, J_\eta$  - главные осевые моменты инерции;  $J_{\varphi\xi}, J_{\varphi\eta}$  - секториально-линейные моменты инерции;  $J_\varphi$  - секториальный момент инерции;  $J_{\xi r}, J_{\eta r}$  - полярно-линейные моменты инерции;  $J_k$  - геометрическая характеристика чистого кручения;  $J_{r\varphi}$  - полярно-секториальный момент инерции;  $\tau_0 = \partial\alpha/\partial z$  - начальный угол закрутки поперечного сечения элемента;  $\alpha$  - текущий угол наклона главных осей инерции поперечного сечения.

Геометрические и секториальные характеристики поперечных сечений лопатки определяются по зависимостям, приведенным в работах [26, 33, 72]. Кинематические характеристики деформации можно выразить через неопределенные коэффициенты  $b_i$  с учетом выражения (2.3), (2.4), (2.5).

$$\delta e = G_1 \cdot b \quad , \quad (2.9)$$

где  $G_1$  - (4x12)-матрица коэффициентов формы со следующими отличными от нуля элементами

$$g_{2,7} = -g_{1,8} = g_{4,12} = 3g_{3,11} = 6Z \quad ;$$

$$g_{2,10} = -g_{1,9} = g_{4,11} = 2 \quad ; \quad g_{3,6} = 1 \quad ; \quad g_{3,12} = 3Z^2 .$$

Вектор неопределенных коэффициентов  $b$  можно получить из выражения (2.6)

$$b = H^{-1} \cdot q \quad , \quad (2.10)$$

где  $H^{-1}$  - (12x12)-матрица, которая имеет следующие отличные от нуля элементы

$$\begin{aligned}
 h'_{7,1} &= -h'_{7,7} = h'_{8,2} = -h'_{8,8} = h'_{12,5} = -h'_{12,11} = 2/a^3; \\
 h'_{11,11} &= 3h'_{7,4} = 3h'_{7,10} = 3h'_{8,3} = 3h'_{8,9} = -h'_{9,2} = h'_{9,8} = \\
 &= -h'_{10,1} = h'_{10,7} = -h'_{11,5} = 3h'_{12,6} = 3h'_{12,12} = 3/a^2; \\
 h'_{9,3} &= 2h'_{9,9} = -h'_{10,4} = -2h'_{10,10} = -h'_{11,6} = 2h'_{11,12} = 2/a; \\
 h'_{1,1} &= h'_{2,2} = -h'_{3,3} = h'_{4,4} = h'_{5,5} = h'_{6,6} = 1.
 \end{aligned}$$

Запишем выражение (2.7) с учетом (2.8), (2.9) и (2.10)

$$\delta U = \int_0^a (\delta q^T (H^{-1})^T G_1^T E_1 G_1 H^{-1} q) dz. \quad (2.11)$$

Матрицы  $H^{-1}$  и  $q$  от  $Z$  не зависят, поэтому их можно вынести за знак интеграла. Обозначим

$$J_1 = \int_0^a (G_1^T E_1 G_1) dz,$$

тогда выражение (2.11) можно записать в квадратичной форме

$$\delta U = \delta q^T K_e q. \quad (2.12)$$

Здесь  $K_e$  есть (12x12)-матрица жесткости рассматриваемого элемента лопатки, которая соответственно равна

$$K_e = (H^{-1})^T J_1 H^{-1}.$$

Однако данное выражение получено в системе координат главных осей инерции. Так как реально элемент находится в общей системе координат лопатки  $OXYZ$  (рис. 2.1), необходимо осуществить переход в эту общую систему координат умножением матрицы жесткости  $K_e$  слева и справа на матрицу направляющих



косинусов

$$K_e = L_1^T (H^{-1})^T Y_1 H^{-1} L_1 . \quad (2.13)$$

Здесь матрица направляющих косинусов  $L_1$  есть квазидиагональная матрица вида

$$L_1 = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} , \quad (2.14)$$

где  $L$  - (6x6)-матрица со следующими отличными от нуля элементами

$$l_{1,1} = l_{2,2} = l_{3,3} = l_{4,4} = \cos \alpha ; \quad l_{1,2} = -l_{2,1} = \\ = l_{3,4} = -l_{4,3} = \sin \alpha ; \quad l_{5,5} = l_{6,6} = 1 .$$

Таким образом, для всех элементов лопатки можно получить матрицы жесткости согласно зависимости (2.13). Упругие характеристики всей лопатки будут определяться глобальной матрицей жесткости  $K$ . По своей структуре это квадратная симметричная матрица, порядок которой равен  $\Pi$ . Он в свою очередь определяется как произведение числа узлов модели на число обобщенных координат в каждом узле. Матрица  $K$  имеет ленточную структуру, половина ширины ленты которой равна 12. Эти свойства позволяют компактно хранить матрицу  $K$  в памяти ЭВМ.

Формирование матрицы  $K$  осуществляется следующим образом. Запишем матрицу жесткости  $i$ -го элемента, определенного выражением (2.13), в виде

$$(K_e)_i = \begin{bmatrix} 1^i & 4^i \\ 3^i & 2^i \end{bmatrix} .$$

Тогда глобальная матрица жесткости  $K$  модели будет сформирована в виде

$$K = \begin{array}{cccccccc}
 \begin{array}{|c|c|} \hline 1^1 & 4^1 \\ \hline \end{array} & & & & & & & \\
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline 3^1 & 2^{1+2} & 4^2 \\ \hline \end{array} & & & & & & & \\
 & \begin{array}{|c|c|} \hline 3^2 & 2^{2+3} \\ \hline \end{array} & & & & & & \\
 & & \begin{array}{|c|c|} \hline \vdots & \vdots \\ \hline \end{array} & & & & & \\
 & & & \begin{array}{|c|c|} \hline 2^{i-1+i} & 4^i \\ \hline \end{array} & & & & \\
 & & & & \begin{array}{|c|c|} \hline 3^i & 2^{i+i} \\ \hline \end{array} & & & \\
 & & & & & \begin{array}{|c|c|} \hline \vdots & \vdots \\ \hline \end{array} & & \\
 & & & & & & \begin{array}{|c|c|} \hline 2^{n-2+n-1} & 4^{n-1} \\ \hline \end{array} & \\
 & & & & & & & \begin{array}{|c|c|} \hline 3^{n-1} & 2^{n-1+n} & 4^n \\ \hline \end{array} \\
 & & & & & & & \begin{array}{|c|c|} \hline 3^n & 2^n \\ \hline \end{array}
 \end{array} \quad (2.15)$$

В матрице (2.15) элементы области  $2^i$  матрицы  $(K_e)_i$  по-членно складываются с элементами области  $1^{i+1}$  матрицы  $(K_e)_{i+1}$ . Такое формирование матрицы  $K$  автоматически обеспечивает совместность деформаций между соседними элементами. Она в целом соответствует вектору глобальных узловых перемещений  $Q$ , имеющему размер  $n$ .

Построенная матрица жесткости отличается тем, что позволяет с позиций технической теории закрученных стержней исследовать любые удлиненные заготовки как незакрученные, так и с большим углом закрутки вдоль продольной оси, имеющие сечения произвольного вида, в том числе концевые и цилиндрические фрезы.

### 2.1.2. Упругие характеристики режущего инструмента

Фрезерование маложестких сложнопрофильных заготовок осуществляют, в основном, торцовыми, цилиндрическими, острозаточенными дисковыми и концевыми фрезами [66]. При фрезеровании на станках с ЧПУ используют, как правило, концевые фрезы [16]. По сравнению с другими приведенными типами фрез они являются маложесткими, однако, не смотря на это их широкое применение обосновано возможностью доступа к различным участкам сложных криволинейных поверхностей. Наличие рабочих и нерабочих участков, в том числе и винтовой рабочей части, соотношение размеров, а также опыт расчетной практики (см. п. 1.2) дают основание представить концевую фрезу в виде дискретной модели - ступенчатого естественно закрученного стержня. Тогда для рассмотрения ее упругих характеристик можно воспользоваться алгоритмом, приведенным в параграфе 2.1.1. Отличительным здесь является отсутствие стесненности кручения.

Матрицу жесткости фрезы (рис. 2.3) (ее конечного элемента) можно описать зависимостью (2.13), однако матрицы, входящие в это выражение, будут отличаться от лопаточных в (2.8), (2.6), (2.9), (2.10), (2.14). Это вызвано тем, что в выражении (2.2) потенциальной энергии элемента будет отсутствовать последнее слагаемое. Тогда  $E_1$  в (2.8) есть (3x3)-матрица и соответственно равна

$$E_1 = \begin{bmatrix} EJ_\xi & 0 & T_0 EJ_{\xi r} \\ 0 & EJ_\eta & -T_0 EJ_{\eta r} \\ T_0 EJ_{r\xi} & -T_0 EJ_{r\eta} & GJ_\kappa \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

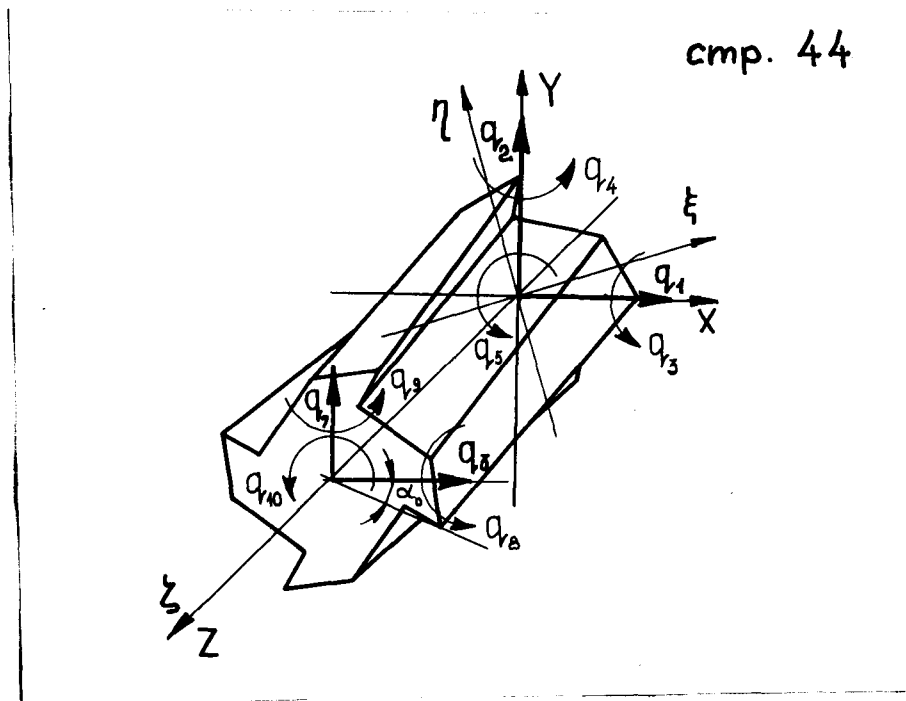


Рис. 2.3. Конечный элемент концевой фрезы.

Матрица  $H^{-1}$  в (2.10) есть (10x10)-матрица со следующими отличными от нуля элементами

$$\begin{aligned} h'_{1,1} = h'_{2,2} = -h'_{3,3} = h'_{4,4} = h'_{5,5} = 1; & \quad h'_{6,1} = \\ = -h'_{6,6} = h'_{7,2} = -h'_{7,7} = 2/a^3; & \quad h'_{8,7} = -h'_{8,2} = -h'_{9,1} = \\ = h'_{9,6} = 3h'_{6,4} = 3h'_{6,9} = -3h'_{7,3} = -3h'_{7,8} = 3/a^2; & \quad (2.17) \\ h'_{8,3} = 2h'_{8,8} = -2h'_{9,9} = -2h'_{10,5} = 2h'_{10,10} = 2/a. & \end{aligned}$$

Матрица  $G_1$  в (2.9) есть (3x10)-матрица со следующими отличными от нуля элементами

$$\begin{aligned} g_{2,4} = -g_{1,8} = 6z; & \quad g_{2,3} = -g_{1,7} = 2; \\ g_{3,10} = 1. & \quad (2.18) \end{aligned}$$

Матрица направляющих косинусов  $L_1$  в (2.14) есть (10x10)-матрица. Здесь (5x5)-матрица  $L$  имеет отличными от нуля следующие элементы

$$\begin{aligned} l_{1,1} = l_{2,2} = l_{3,3} = l_{4,4} = \cos \alpha; & \\ l_{1,2} = -l_{2,1} = l_{3,4} = -l_{4,3} = \sin \alpha; & \quad l_{5,5} = 1. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Таким образом, (10x10)-матрица жесткости элемента фрезы  $K_e$  определяется зависимостью (2.13), однако сомножители  $E_1$ ,  $H^{-1}$ ,  $G_1$ ,  $L_1$  формируются соответственно по (2.16), (2.17), (2.18), (2.19). Глобальная матрица жесткости фрезы в целом определяется выражением (2.15).

Для определения геометрических параметров, входящих в выражение (2.16), рассмотрим поперечное сечение фрезы (рис. 2.4). На чертежах концевых фрез оп поперечном сечении можно получить ограниченную информацию. Так, в настоящее время ис-

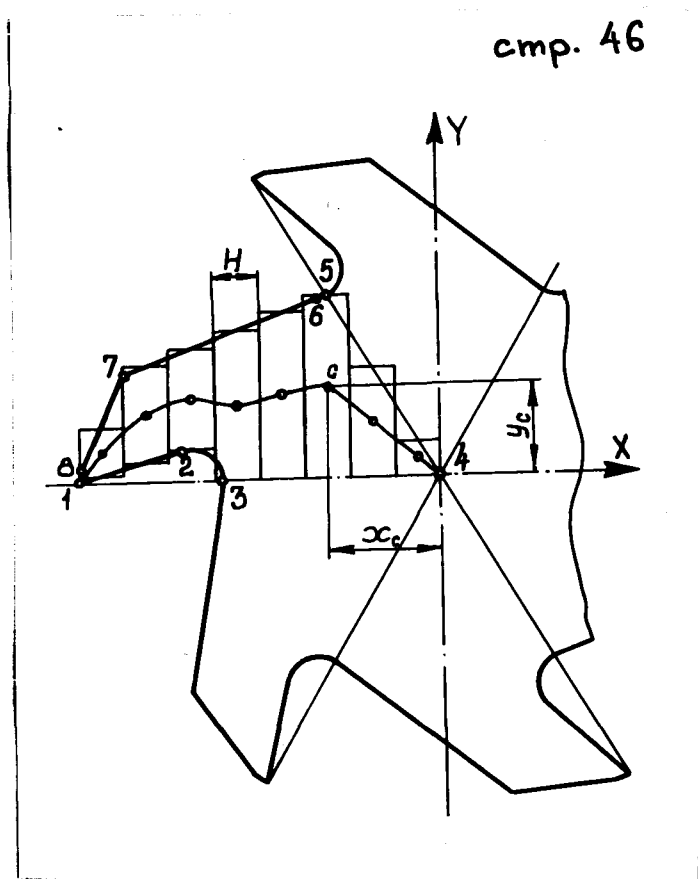


Рис. 2.4. Дискретизация поперечного сечения фрезы для расчета геометрических характеристик.

пользуют три основных способа задания информации о поперечном сечении фрезы [71, 105]. Они представлены на рис. 2.5, а, б, в. Из этих рисунков можно получить следующую информацию о поперечном сечении фрезы:  $R$  - радиус;  $H$  - высота зуба;  $r$  - радиус сопряжения у корня зуба;  $f$  - ширина фаски по задней поверхности;  $\gamma$  - передний угол;  $\alpha$  - задний угол;  $\theta$  - угол между передней поверхностью и тыльной частью зуба;  $\alpha_1$  - начальный угол тыльной части;  $f_1$  - расстояние до перемычки в случае ломаной тыльной части;  $R_1$  - радиус в случае радиусной тыльной части;  $n$  - число зубьев.

Поперечное сечение можно разбить на секторы (рис. 2.4), число которых соответствует числу зубьев. Угол каждого сектора  $\varphi = 360/n$ . Для определения геометрических параметров можно воспользоваться одним из этих секторов. Для формализации задачи выберем наиболее общий представитель поперечного сечения и покажем особые точки, координаты  $X$  и  $Y$  которых необходимо определить. Для всех трех способов задания поперечного сечения координаты точек 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 определяются по зависимостям

$$\left. \begin{array}{l} X_1 = -R \\ Y_1 = 0 \end{array} \right\}; \left. \begin{array}{l} X_2 = -R + H - r \operatorname{tg}(\gamma + \theta/2) \cdot \cos \gamma \\ Y_2 = H \cdot \operatorname{tg} \gamma - r \operatorname{tg}(\gamma + \theta/2) \cdot \sin \gamma \end{array} \right\};$$

$$\left. \begin{array}{l} X_r = X_2 + r \sin \gamma \\ Y_r = Y_2 - r \cos \gamma \end{array} \right\}; \left. \begin{array}{l} X_3 = X_r + r \\ Y_3 = 0 \end{array} \right\}; \quad (2.20)$$

$$\left. \begin{array}{l} X_6 = [X_r + r \cos(90 - \theta - \gamma)] \cos \varphi + [Y_r - r \sin(90 - \theta - \gamma)] \sin \varphi \\ Y_6 = [Y_r - r \sin(90 - \theta - \gamma)] \cos \varphi - [X_r + r \cos(90 - \theta - \gamma)] \sin \varphi \end{array} \right\};$$

$$\left. \begin{array}{l} X_5 = X_3 \cos \varphi + Y_3 \sin \varphi \\ Y_5 = X_3 \sin \varphi + Y_3 \cos \varphi \end{array} \right\}; \left. \begin{array}{l} X_8 = -R + f \operatorname{tg} \alpha \\ Y_8 = f \end{array} \right\}.$$

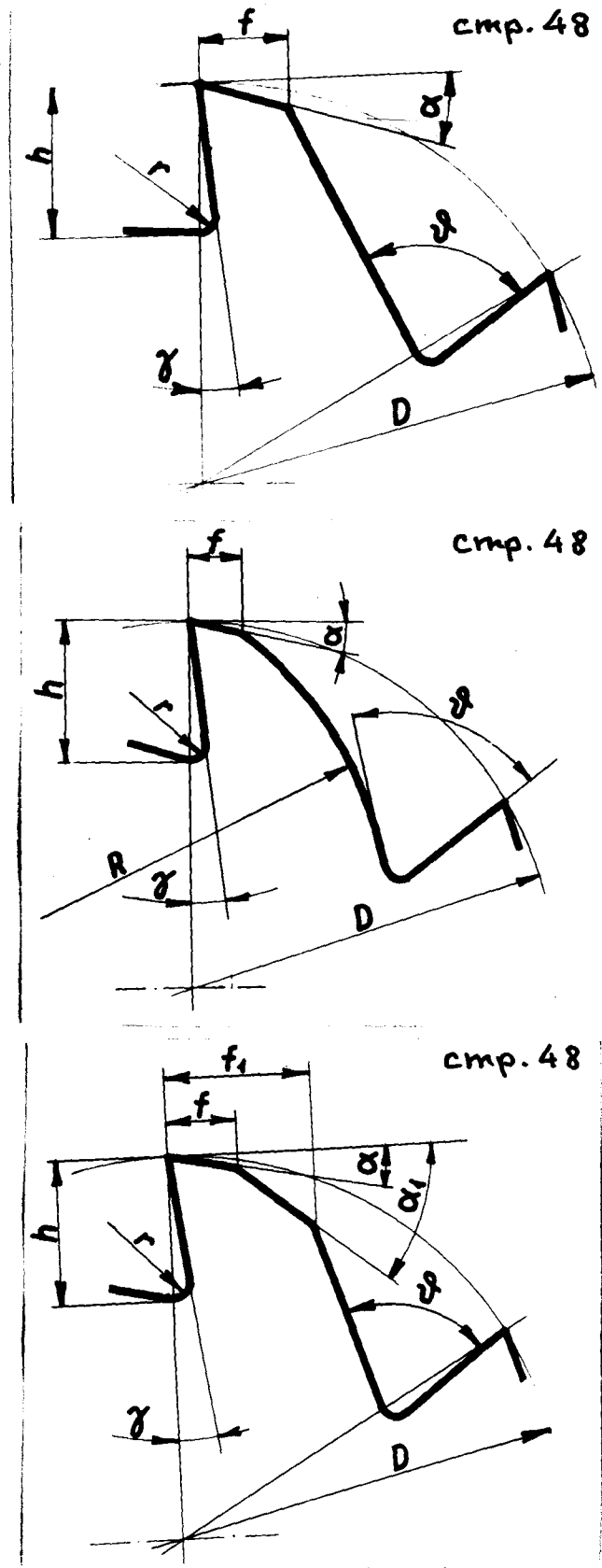


Рис. 2.5. Способы задания исходной информации о поперечных сечениях концевых фрез.



Для первого способа задания (рис. 2.5,а) эта информация является полной. Для второго способа задания (рис. 2.5,б) необходимо добавить координаты точки 7.

$$\left. \begin{aligned} X_7 &= X_8 + (f_1 - f) \operatorname{tg} \alpha_1 \\ Y_7 &= Y_8 + (f_1 - f) \operatorname{ctg} \alpha_1 \end{aligned} \right\} .$$

Для третьего способа задания (рис. 2.5,в) необходимо определить координаты центра окружности радиусной тыльной части

$$\left. \begin{aligned} X_{R_1} &= X_8 + R_1 \sin(90 - \alpha_1) \\ Y_{R_1} &= Y_8 - R_1 \cos(90 - \alpha_1) \end{aligned} \right\} .$$

Зная координаты всех особых точек, можно определить геометрические параметры рассматриваемого сектора поперечного сечения фрезы. Для этого разобьем сектор на вертикальные прямоугольники с нагом  $H_i$  вдоль оси  $OX$  (рис. 2.4). Определив для каждого прямоугольника в секторе координаты  $X_c$  и  $Y_c$  центра тяжести — точки, лежащей на срединной линии сектора, а также высоту  $b_i$  и ширину  $H_i$  прямоугольника, можно получить для него следующие геометрические параметры

$$\left. \begin{aligned} S_i^1 &= H_i b_i ; & Y_{x_i}^1 &= S_i^1 \cdot Y_{c_i}^2 ; \\ Y_{y_i}^1 &= S_i^1 X_{c_i}^2 ; & Y_{xy_i}^1 &= S_i^1 \cdot X_{c_i} \cdot Y_{c_i} ; \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

где  $S_i^1$  — площадь  $i$ -го прямоугольника первого сектора;  $Y_{x_i}^1$ ,  $Y_{y_i}^1$  — осевые моменты инерции  $i$ -го прямоугольника первого сектора;  $Y_{xy_i}^1$  — реактивный момент инерции  $i$ -го прямоугольника первого сектора;  $Y_{x_{r_i}}^1$ ,  $Y_{y_{r_i}}^1$  — радиально-линейные моменты инерции.

Получив выражения (2.21) для всех прямоугольников сектора и просуммировав их по числу прямоугольников, получим соответствующие параметры для остальных  $K$ -х секторов попережного сечения по зависимостям [95]

$$\begin{aligned} J_x^K &= J_x^1 \cdot \cos^2[\varphi(K-1)] + J_y^1 \cdot \sin^2[\varphi(K-1)] - J_{xy}^1 \sin[2\varphi(K-1)]; \\ J_y^K &= J_y^1 \cdot \cos^2[\varphi(K-1)] + J_x^1 \cdot \sin^2[\varphi(K-1)] - J_{xy}^1 \sin[2\varphi(K-1)]; \\ J_{xy}^K &= J_{xy}^1 \cdot \cos[2\varphi(K-1)] - \frac{1}{2}(J_y^1 - J_x^1) \cdot \sin[2\varphi(K-1)]. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Для определения полярно-линейных моментов инерции  $K$ -х секторов необходимо осуществить поворот срединной линии на угол  $\varphi(K-1)$  и определить  $J_{x\gamma}^K$  и  $J_{y\gamma}^K$  по формулам (2.21). Площади всех секторов равны. Просуммировав геометрические параметры для всех  $K$ -тых секторов, получит их для всего попережного сечения. Теперь можно получить главные моменты инерции и угол наклона главных осей инерции  $\alpha$

$$\begin{aligned} \alpha &= \operatorname{arctg} \left( \frac{2 J_{xy}}{J_y - J_x} \right) / 2 ; \\ J_u &= \frac{1}{2} \left[ J_x + J_y \pm \sqrt{(J_x - J_y)^2 + 4 J_{xy}^2} \right] ; \\ J_v &= \frac{1}{2} \left[ J_x + J_y \mp \sqrt{(J_x - J_y)^2 + 4 J_{xy}^2} \right] . \end{aligned} \quad (2.23)$$

Если  $J_x > J_y$ , то в выражении (2.23) пишутся верхние знаки, а если  $J_x < J_y$  - нижние. Геометрическую характеристику чистого кручения можно получить по аналогии с [26]

$$J_k = \frac{\pi b^6}{512} c \left( 1 + \frac{2}{3} c^2 + c^4 \right) , \quad (2.24)$$

где  $b$ ,  $c$  - полуоси эквивалентного эллиптического сечения, имеющего главные моменты инерции  $J_u$  и  $J_v$ , численно равные

главным осевым моментам инерции сечения фрезы, полученным по зависимостям (2.23). Размеры полуосей эллипса можно получить, зная те же определенные выше главные осевые моменты инерции  $J_u$ ,  $J_v$

$$a = \sqrt[8]{\frac{1}{\pi} \cdot \frac{J_u^3}{J_v}} \quad ; \quad b = \sqrt[8]{\frac{1}{\pi} \cdot \frac{J_v^3}{J_u}} \quad . \quad (2.25)$$

Таким образом, при наличии ограниченной информации о геометрии фрезы можно в автоматизированном режиме получить геометрические параметры поперечных сечений концевых и цилиндрических фрез любых типоразмеров с числом зубьев от двух и более, а также любых сверл.

Описанный алгоритм расчета деформаций концевых фрез применим для фрез широкой гаммы. Он позволяет при наличии ограниченной исходной технологической информации полностью формализовать решение задачи с включением элементов САПР.

### 2.1.3. Упругие характеристики системы крепления маложесткой сложнопрофильной заготовки и режущего инструмента на станке

При определении деформативных характеристик турбинной лопатки на операции фрезерования ее рабочего профиля важным фактором является учет податливости элементов крепления лопатки в станочном приспособлении. Решение задачи осложняется тем, условия закрепления могут варьироваться в широких пределах. Для лопаток цилиндров высокого и среднего давления закрепление, как правило, осуществляют только со стороны го-

ловной и хвостовой частей [12]. При обработке лопаток цилиндров низкого давления для увеличения жесткости профиля подвижные и неподвижные лонеты, подводимые опоры и ложементы. Здесь важным является корректный учет влияния условий закрепления на деформативность маложесткой заготовки.

Представляется возможным полностью формализовать данную задачу применительно к стержневой теории метода конечных элементов и к алгоритму, описанному в предыдущих двух параграфах.

Рассмотрим фрагмент турбинной лопатки, один из узлов которой является упругой заделкой, причем сама лопатка есть недеформируемое твердое тело. Представим это схематично (рис. 2.6). Пусть имеется два элемента стержня, сопряженные между собой: элемент  $i$  с узлами №  $i$  и  $i+1$ , а также элемент с узлами №  $i+1$  и  $i+2$ , причем узел  $i+1$  является упругой заделкой. Рассмотрим предельный случай, когда в каждом из трех узлов действуют следующие обобщенные силы:  $P_x^i, P_y^i, M_x^i, M_y^i, M_z^i, B_\varphi$ .

Условия равновесия рассматриваемого фрагмента лопатки можно описать в следующем виде

$$K_s \cdot q_s = P_s, \quad (2.26)$$

где  $K_s$  -  $(18 \times 18)$ - матрица жесткости упругой заделки;  $q_s$  - вектор обобщенных координат  $i$ -го и  $i+1$ -го сопряженных конечных элементов размером  $18 \times 1$ ;  $P_s$  - вектор обобщенных силовых параметров, приведенным к узлам  $i$ -го и  $i+1$ -го элементов размером  $18 \times 1$ .

Построение матрицы жесткости упругой заделки  $K_s$  целесообразно осуществлять путем построения матриц податливости,

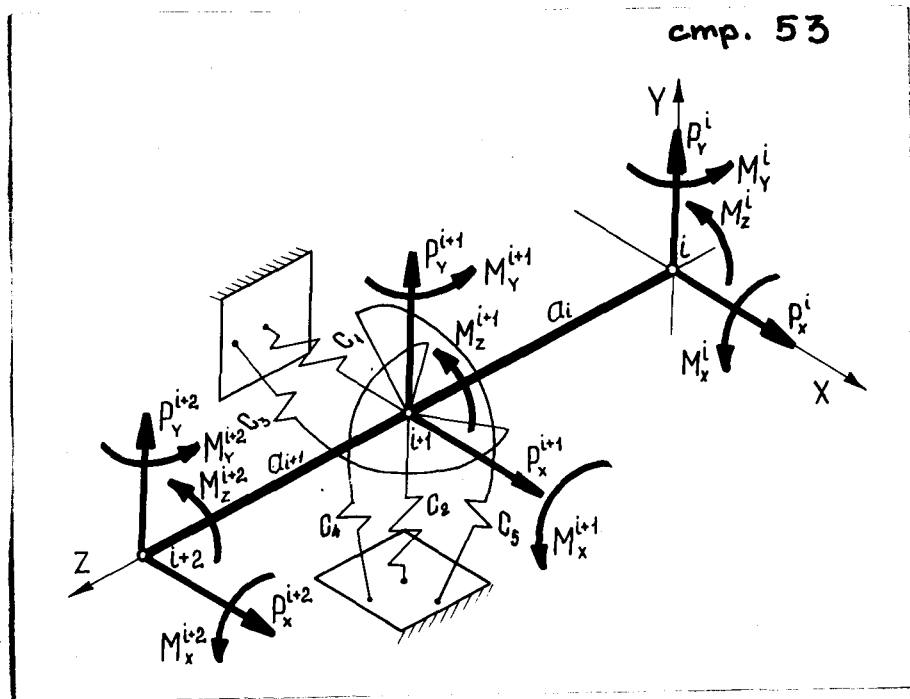


Рис. 2.6. Фрагмент турбинной лопатки, один из узлов которой является упругой заделкой.

и перехода к матрицам жесткости, т.е.  $K_s = (e_s)^{-1}$ , где  $e_s$  матрица податливости рассматриваемого фрагмента лопатки. Она имеет следующий вид

$$e_s = \begin{bmatrix} e^1 & e^4 & e^6 \\ e^7 & e^2 & e^5 \\ e^9 & e^8 & e^3 \end{bmatrix}, \quad (2.27)$$

где  $e^1 \dots e^9$  - (6x6)-матрицы со следующими отличными от нуля элементами

$$e_{i,i}^j = e_i, \quad i = 1, \dots, 6, \quad j_1 = 1, \dots, 9;$$

$$e_{1,4}^1 = e_{4,1}^1 = -a_1 e_4; \quad e_{2,3}^1 = e_{3,2}^1 = a_1 e_3;$$

$$e_{1,4}^3 = e_{4,1}^3 = a_2 e_4; \quad e_{2,3}^4 = a_1 e_3;$$

$$e_{1,4}^4 = -a_1 e_4; \quad e_{2,3}^3 = e_{3,2}^3 = -a_2 e_3;$$

$$e_{3,2}^5 = -a_2 e_3; \quad e_{4,1}^5 = a_2 e_4;$$

$$e_{1,4}^6 = -a_1 e_4; \quad e_{2,3}^6 = a_1 e_3;$$

$$e_{3,2}^6 = -a_1 e_3; \quad e_{4,1}^6 = a_1 e_4;$$

$$e_{1,4}^7 = -a_1 e_4; \quad e_{3,2}^7 = a_1 e_3;$$

$$e_{2,3}^8 = -a_2 e_3; \quad e_{1,4}^8 = a_2 e_4;$$

$$e_{1,4}^9 = a_2 e_4; \quad e_{2,3}^9 = -a_2 e_3;$$

$$e_{3,2}^9 = a_2 e_3; \quad e_{4,1}^9 = -a_2 e_4.$$

В том случае, когда граничные условия накладываются в крайних узлах модели, матрица  $e_s$  будет несколько изменена. Для левого крайнего узла она будет иметь вид

$$(e_s)_L = \begin{bmatrix} e^2 & e^5 \\ e^8 & e^3 \end{bmatrix}, \quad (2.28)$$

а для правого крайнего узла

$$(e_s)_P = \begin{bmatrix} e^1 & e^4 \\ e^7 & e^2 \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Используя выражения (2.27)-(2.29), можно построить матрицы жесткости для приведенных трех случаев

$$K_s = (e_s)^{-1}; \quad K_{sL} = (e_s)_L^{-1}; \quad K_{sP} = (e_s)_P^{-1}. \quad (2.30)$$

Воспользовавшись матрицами (2.30), можно модифицировать глобальную матрицу жесткости  $K$  в выражении (2.15) путем прибавления к ее элементам для соответствующих узлов, в которых вводятся граничные условия, элементов приведенных матриц в зависимости от расположения данных узлов.

Систему крепления фрезы в шпинделе станка можно также представить как упругую заделку. Тогда глобальную матрицу жесткости фрезы в выражении (2.15) необходимо модифицировать путем прибавления к ее элементам для первого узла элементов матрицы (2.30), исключив из нее строки и столбцы с  $e_6$ .

Такой алгоритм решения является инвариантным по отношению к виду и количеству элементов системы крепления. Зная их собственные жесткости, полученные аналитически или экспериментально, можно модифицировать ГМЖ модели, т.е. учесть влияние системы крепления на деформативность заготовки и фрезы.

#### 2.1.4. Формирование вектора силовых параметров

В самом общем случае на заготовку при механической обработке могут действовать три основных вида силовых параметров:

- 1). Объемные силы – возникают в заготовке после операции штамповки и др. Однако, после термообработки заготовок, как правило, удается добиться минимума этих сил, поэтому в расчетах их можно не учитывать.
- 2). Сосредоточенные силы – силы резания, возникающие при взаимодействии режущего инструмента и заготовки.
- 3). Поверхностные силы – возникают в результате появления технологических остаточных напряжений в поверхностном слое обработанной заготовки.

Для формирования вектора силовых параметров воспользуемся принципом суперпозиции, т.е. рассмотрим сосредоточенные и поверхностные силы отдельно. Тогда вариацию работы внешних сил  $\delta A$  в выражении (2.1) можно записать в следующем виде

$$\delta A = \delta A_c + \delta A_n, \quad (2.32)$$

где  $\delta A_c$  – вариация работы сосредоточенных сил;  $\delta A_n$  – вариация работы поверхностных сил.

Рассмотрим подробнее вариацию работы сосредоточенных сил  $\delta A_c$ . Она соответственно равна

$$\delta A_c = \delta D^T \cdot R_0, \quad (2.33)$$

где  $\delta D$  – вариация вектора деформации в точке приложения си-



лы резания,  $\delta D = \{\delta u \delta v \delta \theta_x \delta \theta_y \delta \theta_z\}^T$ ;

$R_0$  - вектор силы резания в точке, приведенной к продольной оси заготовки,

Для формирования вектора  $R_0$  рассмотрим взаимодействие режущего инструмента (концевая фреза) и заготовки (турбинной лопатки) (рис. 2.7). Силу резания  $\vec{F}$ , возникающую при этом, можно разделить на составляющие:  $\vec{P}_T$  - окружная, направлена по касательной к направлению вращения фрезы;  $\vec{P}_r$  - радиальная, направлена в радиальном направлении от центра фрезы перпендикулярно  $\vec{P}_T$ ;  $\vec{P}_{oc}$  - осевая, направлена вдоль продольной оси фрезы  $OZ$ . Они связаны между собой соотношениями

$$P_r = f P_T ; \quad P_{oc} = P_T \cdot \operatorname{tg} \beta , \quad (2.34)$$

где  $f$  - коэффициент трения между передней поверхностью зуба фрезы и стружкой;  $\beta$  - угол наклона винтовой канавки зуба.

В свою очередь

$$P_T = \rho \cdot S , \quad (2.35)$$

где  $S$  - площадь сечения срезаемого слоя;  $\rho$  - удельная сила резания.

Удельная сила резания  $\rho$  соответственно равна [67]

$$\rho = (1.3 \div 1.4) \sigma_b \xi , \quad (2.36)$$

где  $\sigma_b$  - предел прочности обрабатываемого материала;  $\xi$  - коэффициент усадки стружки.

Удельная сила резания  $\rho$  может быть определена также по таблицам с учетом химического состава обрабатываемого ма-

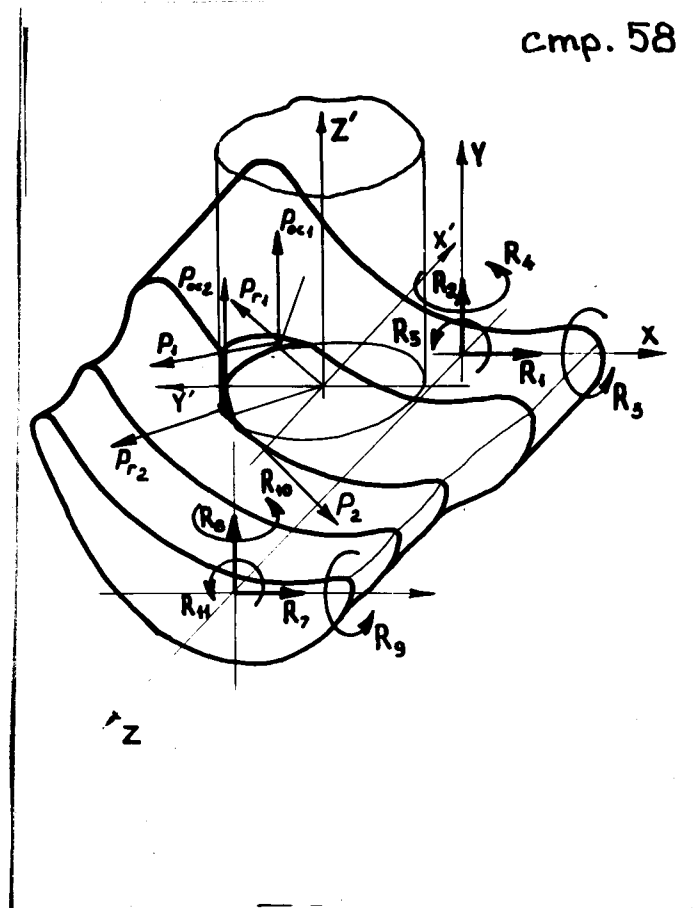


Рис. 2.7. Приведение силы резания к узлам дискретной модели.

териала [138]. Для определения площади среза  $S$  можно воспользоваться зависимостями [113]

$$S = b_i a_i \cos \alpha, \quad (2.37)$$

где  $\alpha$  - угол между нормалью к поверхности заготовки в формообразующей точке и осью фрезы.

Значения  $a_i$  и  $b_i$  по аналогии с [93] можно получить путем рассмотрения кинематики взаимодействия криволинейной поверхности маложесткой заготовки и фрезы (рис. 2.7). Для определения этих величин можно воспользоваться упрощенными зависимостями

$$\begin{aligned} a_i &= S_z \cdot \sin \psi_i; \\ b_i &= r \cdot \operatorname{tg} \beta (\sin \psi_i - 1) + \frac{t}{\cos \alpha} \end{aligned} \quad (2.38)$$

где  $S_z$  - рабочая подача на зуб;  $r$  - радиус фрезы;  $t$  - глубина резания;  $\psi_i$  - мгновенный угол поворота.

Рассмотрим формирование силы  $\vec{F}$  в системе координат фрезы  $X^*Y^*Z^*$  для  $i$ -го зуба фрезы, участвующего в резании, с учетом зависимостей (2.34)

$$\begin{aligned} F_{x^*_i} &= P_{T_i} (f \cos \psi_i - \sin \psi_i); \\ F_{y^*_i} &= P_{T_i} (f \sin \psi_i + \cos \psi_i); \\ F_{z^*_i} &= P_{T_i} \cdot \operatorname{tg} \beta. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Особенностью вектора  $R_o$  является то, что он имеет отличными от нуля только составляющие  $R_{x_i}$ ,  $R_{y_i}$ ,  $M_{z_i}$ , которые с учетом (2.34) и (2.39) для  $i$ -го зуба фрезы соответственно

определяются следующими зависимостями

$$R_{x_i} = P_{T_i} \cdot k_{x_i}; \quad R_{y_i} = P_{T_i} \cdot k_{y_i}; \quad M_{z_i} = P_{T_i} \cdot k_{M_i}. \quad (2.40)$$

Коэффициенты при  $P_{T_i}$ , входящие в (2.40), имеют следующий вид

$$\begin{aligned} k_{x_i} &= (f \cos \psi_i - \sin \psi_i) \cos(\hat{X}, X^*) + (f \sin \psi_i + \cos \psi_i) \cos(\hat{X}, Y^*) + \\ &\quad + \operatorname{tg} \beta \cdot \cos(\hat{X}, Z^*); \\ k_{y_i} &= (f \cos \psi_i - \sin \psi_i) \cos(\hat{Y}, X^*) + (f \sin \psi_i + \cos \psi_i) \cos(\hat{Y}, Y^*) + \\ &\quad + \operatorname{tg} \beta \cdot \cos(\hat{Y}, Z^*); \\ k_{M_i} &= k_{y_i} X_i - k_{x_i} Y_i, \end{aligned}$$

где  $X_i$ ,  $Y_i$  - координаты  $X$  и  $Y$  точки приложения силы резания.

В случае, когда в резании участвуют одновременно несколько зубьев фрезы, необходимо просуммировать выражение (2.40) по числу находящихся в зоне резания зубьев. Сформированный таким образом вектор может быть использован для расчета деформации фрезы.

Так как для анализа деформативности лопатки была принята дискретная модель, то возможен случай, когда точка приложения силы находится между узлами модели. При этом необходимо соответствующим образом сформировать вектор обобщенных узловых сил  $R_e$  в конечном элементе модели. Для этого рассмотрим подробнее выражение (2.33). Здесь вектор деформации  $\delta D$  можно получить с учетом выражений (2.4), (2.5) и (2.10)

$$\delta D = G_2 H^{-1} \delta q, \quad (2.41)$$

где  $\mathbf{q}$  —  $(5 \times 12)$ -матрица коэффициентов формы со следующими отличными от нуля элементами

$$\begin{aligned} q_{1,1} &= q_{2,5} = q_{3,9} = -q_{4,6} = q_{5,2} = 1; \\ q_{1,2} &= q_{2,6} = q_{3,10} = Z; \quad q_{1,3} = q_{2,7} = q_{3,11} = Z^2; \\ q_{1,4} &= q_{2,8} = q_{3,11} = Z^3; \quad q_{5,3} = -q_{4,7} = 2Z; \\ q_{5,4} &= -q_{4,8} = 3Z^2. \end{aligned}$$

Выражение (2.33) с учетом (2.40) и (2.41) можно записать окончательно

$$\delta A_e = \delta \mathbf{q}^T \cdot \mathbf{R}_e. \quad (2.42)$$

Здесь  $\mathbf{R}_e$  есть вектор обобщенных узловых сосредоточенных сил следующего вида

$$\mathbf{R}_e = (\mathbf{H}^{-1})^T \mathbf{G}_2 \mathbf{R}_0. \quad (2.43)$$

Рассмотрим второе слагаемое выражения (2.33)

$$\delta A_n = \int_0^a (\delta \mathbf{D} \cdot \mathbf{P}_n) dZ, \quad (2.44)$$

где  $\mathbf{P}_n$  — вектор поверхностных сил, который включает в себя следующие элементы  $\mathbf{P}_n = \{P_x, P_y, M_x, M_y, M_z\}^T$ .

Для формирования вектора в выражении (2.44) введем подвижную естественную систему координат с осями  $\vec{\tau}$ ,  $\vec{n}$ ,  $\vec{\nu}$ , начало которой перемещается вдоль срединной линии в поперечном сечении элемента (рис. 2.8). Естественная система координат ориентирована так, что бинормаль  $\vec{\nu}$  параллельна оси  $OZ$

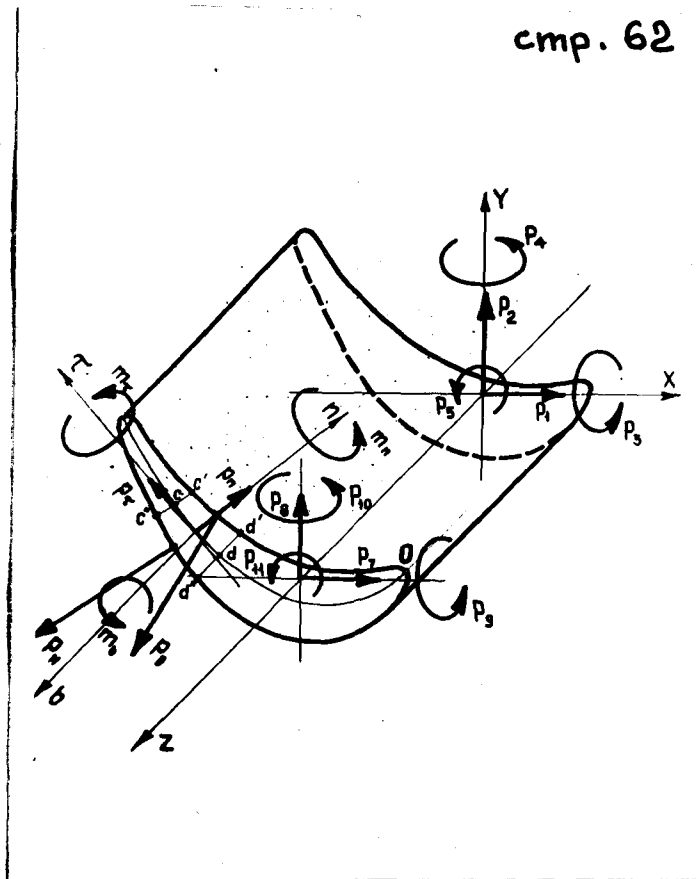


Рис. 2.8. Приведение поверхностных сил к узлам дискретной модели.

заготовки. Начало отсчета находится в точке  $O$ .

Рассмотрим формирование приведенной поверхностной силы  $P_0$  на отрезке  $d\tau$  с центром в точке  $O_1$  срединной линии. На данном отрезке со стороны внутреннего и наружного профиля действуют интегральные поверхностные напряжения  $q_b$  и  $q_n$ . Эти напряжения можно определить с помощью выражения (I.I). Они могут быть также получены как функции режимов резания [II7]

$$q_{b,n} = C_q V_s^{a_1} S_z^{a_2} t^{a_3} + a_4, \quad (2.45)$$

где  $V_s$  - скорость резания;  $C_q, a_1 \dots a_4$  - эмпирические коэффициенты.

Величины  $q_b$  и  $q_n$  имеют с естественным трехгранником следующие направляющие косинусы

$$k_b = \cos(q_b^{\wedge}, \tau); \quad l_b = \cos(q_b^{\wedge}, n); \quad m_b = \cos(q_b^{\wedge}, b);$$

$$k_n = \cos(q_n^{\wedge}, \tau); \quad l_n = \cos(q_n^{\wedge}, n); \quad m_n = \cos(q_n^{\wedge}, b);$$

Тогда вектор приведенных поверхностных сил

$$P_0 = L_3 \cdot P^*; \quad P^* = \begin{bmatrix} q_b & S_b \\ q_n & S_n \end{bmatrix}, \quad (2.46)$$

где  $P^* = \{q_{\tau} \ q_n \ m_{\tau} \ m_n \ m_b\}^T$  - вектор удельной поверхностной силы, приведенной к точке  $O$ ;  $S_b, S_n$  - участки профиля со стороны внутреннего и наружного контура для приращения  $d\tau$  (на рис. 2.8  $d\tau = ad'$ ,  $S_b = a'd'$ ,  $S_n = a''d''x$ );  $L_3$  - (5x2)-матрица приведения со следующими отличными от нуля элементами

$$l_{1,1} = k_b; l_{1,2} = k_n; l_{2,1} = l_b; l_{2,2} = l_n; l_{3,1} = -h \cdot m_b; \\ l_{3,2} = h \cdot m_n; l_{5,1} = -h k_b; l_{5,2} = h \cdot k_n,$$

$h$  - расстояние от срединной линии до точек приложения  $q_{n,b}$ .  
Для всего сечения вектор  $P_0$  будет иметь вид

$$P_0 = \int_0^{a_1} (L_2 L_3 P^*) d\tau, \quad (2.47)$$

где  $L_2$  - (5x5)-матрица приведения вектора  $P^*$  к оси  $OZ$  со следующими отличными от нуля элементами

$$l_{1,1} = l_{2,2} = l_{3,3} = \cos \beta; l_{2,1} = -l_{1,2} = \\ = l_{4,3} = -l_{3,4} = \sin \beta; l_{5,5} = 1$$

$\beta$  - текущий угол между  $\tau$  и осью  $Ox$ .

Окончательно  $\delta A_n$  в выражении (2.44) с учетом (2.41) и (2.47) можно записать

$$\delta A_n = \delta q^T \cdot P_e. \quad (2.48)$$

Здесь  $P_e$  есть вектор обобщенных узловых поверхностных сил

$$P_e = (H^{-1})^T \int_0^a G_2^T \int_0^{a_1} (L_2 L_3 P^*) d\tau dz. \quad (2.49)$$

В результате проведенного исследования удалось построить вектор обобщенных силовых параметров элемента дискретной модели. Построенный алгоритм позволяет автоматически формировать данный вектор в зависимости от технологических параметров обработки. При этом осуществляется приведение силовых парамет-



ров к узлам модели в зависимости от точки приложения силы внутри элемента. Это позволяет корректно учесть влияние деформирующей способности силовых параметров на деформативность модели.

### 2.1.5. Формирование вектора деформации в комплексной упругой технологической системе

Вектор деформации в комплексной упругой технологической системе может быть получен при рассмотрении механики взаимодействия режущего инструмента и маложесткой сложнопрофильной заготовки.

Полный вектор деформации  $\Delta Q$  в рассматриваемом узле модели можно получить при отдельном рассмотрении заготовки и режущего инструмента (рис. 2.9). Тогда

$$\Delta Q = \Delta Q_z + \Delta Q_u, \quad (2.50)$$

где  $\Delta Q_z$  — вектор деформации заготовки,  $\Delta Q_u$  — вектор деформации режущего инструмента.

На формирование вектора  $\Delta Q_z$  существенное влияние оказывает изменение припуска заготовки. Учет переменности припуска в модели целесообразно осуществлять следующим образом. В качестве исходной информации о заготовке целесообразно принять чертежные данные готовой лопатки, которые включают в себя радиусографическое или точечное описание набора поперечных сечений с дискретностью 50 + 100 мм вдоль продольной оси. Припуск же учитывать при помощи построения сечений, эквидистантных к заданному чертежу, причем сами эквидистанты меня-

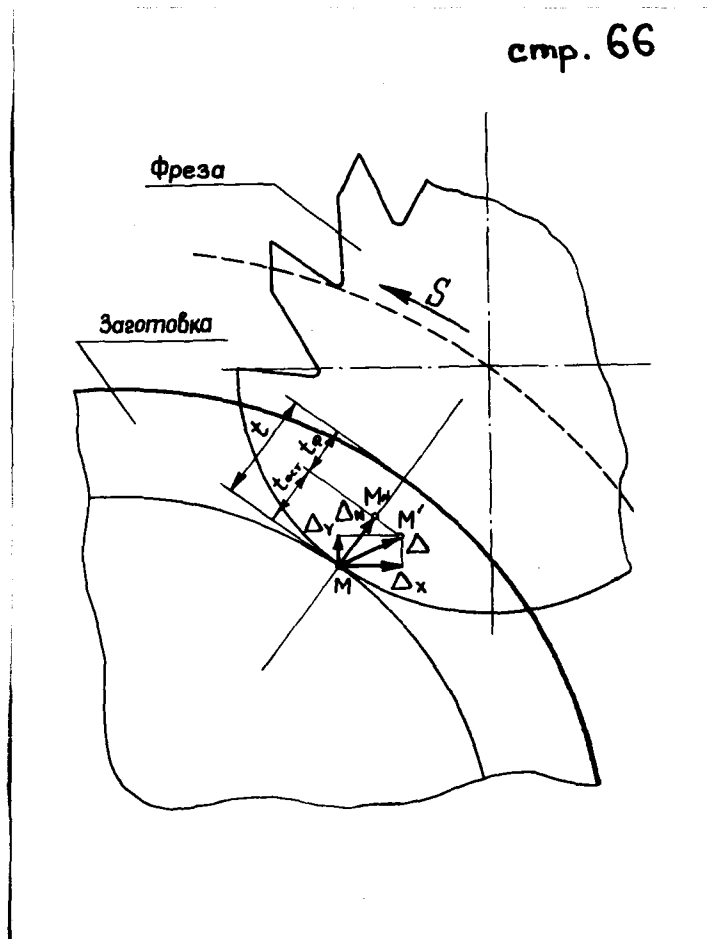


Рис. 2.9. Формирование вектора деформации при взаимодействии режущего инструмента и маложесткой заготовки.

ется вдоль продольной оси лопатки по следующему закону

$$\delta = \delta_0 + \delta(z) , \quad (2.51)$$

где  $\delta$  - полный припуск на обработку;  $\delta_0$  - припуск на последующую обработку;  $\delta(z)$  - текущее значение припуска на данную операцию для заданной координаты  $z$ .

Величина  $\delta(z)$  в выражении (2.51) может быть получена следующим образом

$$\delta(z) = N_1 \delta_1 + N_2 \delta_2 + N_3 \delta_3 , \quad (2.52)$$

где  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  - значения средних эквидистант в трех контролируемых перед обработкой сечениях [II7];  $N_1, N_2, N_3$  - функции формы, которые соответственно равны

$$N_1 = \left(1 - \frac{2z}{L}\right) \left(1 - \frac{z}{L}\right) ; \quad N_2 = \frac{4z}{L} \left(1 - \frac{z}{L}\right) ;$$

$$N_3 = -\frac{z}{L} \left(1 - \frac{2z}{L}\right) ,$$

где  $L$  - длина рабочего профиля лопатки;  $z$  - текущая продольная координата вдоль оси  $OZ$ .

Сформированный таким образом новый набор эквидистантных поперечных сечений используется для расчета геометрических параметров этих сечений в выражении (2.8). Данный подход позволяет учесть влияние перераспределения припуска на деформативность обрабатываемой заготовки. Вектор деформации в рассматриваемой точке заготовки можно получить из вектора глобальных узловых перемещений  $Q$ . Для этого рассмотрим уравнение равновесия (2.1) с учетом (2.12), (2.42) и (2.48) для

всей модели лопатки

$$\delta Q^T K Q = \delta Q^T R + \delta Q^T P . \quad (2.53)$$

Матрицы и векторы, входящие в (2.53), определяются следующим образом

$$\delta Q = \sum_{e=1}^{e=n} \delta Q_e ; \quad R = \sum_{e=1}^{e=n} R_e ;$$

$$P = \sum_{e=1}^{e=n} P_e ; \quad Q = \sum_{e=1}^{e=n} Q_e ,$$

где  $\delta Q$  - вариация глобального вектора обобщенных узловых координат;  $R$  - глобальный вектор обобщенных сосредоточенных сил;  $P$  - глобальный вектор обобщенных поверхностных сил;  $Q$  - глобальный вектор обобщенных узловых координат;  $n$  - число конечных элементов модели.

Выражение (2.53) можно упростить путем исключения из левой и правой частей отличного от нуля вектора  $\delta Q$ . Получим систему линейных уравнений. Определение вектора глобальных узловых перемещений в ней можно осуществить методом исключения Гаусса. Для полученного вектора  $Q$  для рассматриваемого узла модели с номером  $m$  формируется вектор деформации  $\Delta q_3$ , имеющий вид

$$\Delta q_3 = \{ q_{j+1}, q_{j+2}, \dots, q_{j+6} \}^T . \quad (2.54)$$

Здесь  $j = (m-1) \cdot 6$  .

Вектор деформации концевой фрезы будем определять по аналогии с (2.53). Однако, правая часть уравнения равновесия будет формироваться только работой обобщенных сосредоточенных сил. Особенностью данного вектора является то, что он имеет

отличными от нуля только элементы, соответствующие последнему узлу модели. Причем их величина определяется согласно зависимостям (2.40). Сам вектор  $\Delta Q_{\nu}$  формируется по аналогии с (2.54). Здесь  $m$  есть номер последнего узла модели. Однако погрешность обработки определяется не самим вектором  $\Delta Q$  в выражении (2.50), а проекцией вектора отклонения  $\Delta$  формообразующей точки на нормаль к поверхности заготовки, проходящую через эту точку. Вектор  $\Delta$  ( $MM'$  на рис. 2.9) с учетом выражения (2.54) для  $\Delta Q$  можно получить следующим образом

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = S \Delta Q, \quad (2.55)$$

где  $S$  - (2x6)-матрица приведения со следующими отличными от нуля элементами

$$S_{1,1} = S_{2,2} = 1; \quad S_{1,5} = -y_0; \quad S_{2,5} = x_0,$$

$x_0, y_0$  - координаты  $x, y$  формообразующей точки.

Проекция вектора  $\Delta$  на нормаль к поверхности заготовки в формообразующей точке ( $MM_N$  на рис. 2.9) будет соответственно равна

$$\Delta_N = C \cdot \Delta, \quad (2.56)$$

где  $C$  - матрица вида  $C = [\cos \alpha_1 \quad \sin \alpha_1]$ ;  $\alpha_1$  - угол между нормалью  $\vec{n}$  и осью  $Ox$ .

В результате выполненных преобразований удалось получить отклонение  $\Delta_N$ , которое определяется соотношением (2.56) и формирует величину погрешности обработки, а также условия механической обработки с учетом обрабатывающих и поверхностных сил. Управление данным вектором позволяет обеспечить требуемую точность обработки при максимальной производительности.

## 2.2. Исследование динамических параметров при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок

Вопросы динамики фрезерования таких маложестких заготовок, как турбинные лопатки, в условиях безлюдной технологии является принципиально важным, так как режимы резания, выбранные на основании статических параметров технологической системы, далеко не всегда могут обеспечить нормальное протекание процесса резания. При этом может произойти потеря точности обработки из-за большой волнистости и шероховатости обработанной поверхности, вызванной интенсивными колебаниями элементов технологической системы. Может также произойти потеря устойчивости невозмущенного движения технологической системы при резании. При наличии последнего фактора дальнейшая обработка практически невозможна. Для исключения приведенных отрицательных факторов рассмотрим условия формирования динамических характеристик технологической системы и взаимодействие их с процессом резания.

### 2.2.1. Построение матрицы инерции и определение собственных частот и форм колебаний заготовки и режущего инструмента

Рассмотрим элемент турбинной лопатки длиной  $dZ$  (рис. 2.1). Выше, в (2.12) уже было получено значение потенциальной энергии для рассматриваемого элемента, а также его матрица жесткости  $K$ , полученная в выражении (2.13). Кинетическая энергия элемента турбинной лопатки может быть записана в виде [26]

$$T = \frac{1}{2} \int_0^a \rho \{ [\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + 2\dot{\theta}_z (\dot{v}\xi_s + \dot{u}\eta_s)] F + \gamma_k \dot{\theta}_z^2 + \gamma_\varphi \dot{\tau}^2 + 2\dot{\theta}_z' (\gamma_\varphi \dot{u}' + \gamma_\eta \dot{v}') \} dz, \quad (2.57)$$

где  $\rho$  - плотность материала лопатки;  $\dot{u}$ ,  $\dot{v}$ ,  $\dot{\theta}_z$  - обобщенные скорости;  $\xi_s$ ,  $\eta_s$  - координаты центра изгиба поперечного сечения элемента лопатки;  $F$  - площадь поперечного сечения.

В выражении (2.57) слагаемые с характеристиками  $\gamma_{\xi\varphi}$ ,  $\gamma_{\eta\varphi}$  влияют на колебания слабо [26, 72, II5], поэтому их можно не учитывать. С учетом сделанного допущения запишем выражение (2.57) в матричной форме

$$T = \frac{1}{2} \rho \int_0^a (\dot{D}^T A \dot{D}) dz, \quad (2.58)$$

где  $\dot{D}$  - вектор скоростей, который имеет вид

$$\dot{D} = \{\dot{u}, \dot{v}, \dot{\theta}_z, \dot{\tau}\}^T;$$

- (4x4)-матрица инерционных коэффициентов следующего вида

$$A = \begin{bmatrix} F & 0 & \eta_s F & 0 \\ 0 & F & \xi_s F & 0 \\ \eta_s F & \xi_s F & \gamma_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_\varphi \end{bmatrix}$$

Вектор скоростей  $\dot{D}$  в выражении (2.58) есть производная по времени от вектора перемещений  $D = \{u, v, \theta_z, \tau\}^T$ , определенного в выражениях (2.4), (2.5). Вектор  $\dot{D}$  соответственно равен

$$\dot{D} = G_3 \dot{b} , \quad (2.59)$$

где  $G_3$  - (4x12)-матрица коэффициентов формы, полученная с учетом перестановок, выполненных в (2.6), а также с учетом (2.9). Она имеет следующие отличные от нуля элементы

$$\begin{aligned} g_{1,1} &= g_{2,2} = g_{3,5} = g_{4,6} = 1 ; \\ g_{1,4} &= g_{2,3} = g_{3,6} = Z ; \quad g_{4,11} = 2Z ; \\ g_{1,10} &= g_{2,9} = g_{3,11} = Z^2 ; \quad g_{4,12} = 3Z^2 ; \\ g_{1,7} &= g_{2,8} = g_{3,12} = Z^3 . \end{aligned}$$

Вектор  $\dot{b}$  можно выразить через вектор обобщенных узловых скоростей  $\dot{q}$ , продифференцировав по времени выражение (2.10) для вектора

$$b = H^{-1} \dot{q} . \quad (2.60)$$

Обозначим

$$M_e^* = (H^{-1})^T J_2 H^{-1} , \quad (2.61)$$

где

$$J_2 = \rho \int_0^a (G_3^T A G_3) dz .$$

Здесь  $M_e^*$  - (12x12)-матрица инерции рассматриваемого элемента лопатки в местной системе координат. Для перехода в общую систему координат XYZ необходимо матрицу  $M_e^*$  домножить на матрицу направляющих косинусов  $L_1$  слева и справа

$$M_e = L_1^T M_e^* L_1 . \quad (2.62)$$





Для построения матрицы инерции конечного элемента концевой фрезы необходимо из выражения (2.57) исключить элементы, характеризующие стесненность кручения, т.е. два последних слагаемых. Дальнейшие построения матрицы инерции фрезы строятся по аналогии с выражениями (2.58)–(2.64).

Поскольку малое сопротивление не оказывает существенно-го влияния на собственные частоты и формы колебаний модели [24, III], можно построить дифференциальные уравнения свободных колебаний без учета этого фактора

$$M \ddot{Q} + K Q = 0 \quad . \quad (2.65)$$

Выражение (2.65) можно преобразовать в виде матричного уравнения

$$(K - \Omega M) V = 0 \quad , \quad (2.66)$$

где  $\Omega$  – матрица квадратов собственных частот;  $V$  – матрица собственных форм колебаний модели.

Матрицы  $\Omega$  и  $V$  вычисляют, используя стандартные программы математического обеспечения для ЕС и СИ ЭВМ [24].

С помощью приведенного алгоритма можно определить собственные частоты и формы колебаний такой маложесткой заготовки, как турбинная лопатка, а также концевой фрезы. Он позволяет формализованно учесть влияние на собственные частоты колебаний таких существенных факторов, как перераспределение припуска заготовки, а также частично снятый при обработке с профильной части припуск .

### 2.2.2. Математическая модель неконсервативной упругой технологической системы в процессе резания

Взаимодействие модели с силами, действующими на нее можно описать системой дифференциальных уравнений

$$M\ddot{Q} + B\dot{Q} + KQ = R. \quad (2.67)$$

Матрицы  $M$  и  $K$  можно вычислить из зависимостей (2.15) и (2.64), а вектор сосредоточенных сил  $R$  — из зависимостей (2.43) и (2.15). Для построения диссипативной матрицы  $B$  необходимо перейти к нормальным координатам. Связь между физическими и нормальными обобщенными координатами определяется зависимостью [24]

$$Q^* = V^T \cdot Q, \quad (2.68)$$

где  $Q^*$  — вектор нормальных обобщенных координат.

Матрица инерции  $M$  и матрица жесткости  $K$  будут трансформированы в нормальных координатах следующим образом

$$M^* = V^T M V; \quad K^* = V^T K V, \quad (2.69)$$

где  $M^*$ ,  $K^*$  — матрицы инерции и жесткости модели в нормальных координатах.

Матрицы  $M^*$  и  $K^*$  являются диагональными. Соответственно и матрица диссипации  $B^*$  в нормальных координатах также будет диагональной [23]

$$B^* = \frac{1}{2\pi} \Psi K^* (\Omega^{-1})^{0.5}, \quad (2.70)$$

где  $\Psi$  - диагональная матрица коэффициентов поглощения;  
 $\Omega$  - диагональная матрица квадратов собственных частот колебаний.

Элементы матрицы  $\Omega$  можно получить с помощью простой зависимости

$$\Omega = (M^*)^{-1} K^*. \quad (2.71)$$

Матрица  $B$ , входящая в выражение (2.67), в физических координатах формируется с помощью обратного модального преобразования

$$B = V B^* V^T. \quad (2.72)$$

При исследовании вынужденных колебаний рассматриваемой упругой системы правая часть системы уравнений (2.67) формируется только вектором сосредоточенных сил  $R$  с учетом выражения (2.43). Математическая модель в данном случае будет иметь следующий вид

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{Q} + B\dot{Q} + KQ &= R \\ R &= \sum_{j=1}^n (H^{-1})^T G_2^T R_j \end{aligned} \right\}. \quad (2.73)$$

При исследовании устойчивости невозмущенного движения правая часть выражения (2.67) будет сформирована вектором

сосредоточенных сил  $R$  в несколько преобразованном виде. С учетом выражений (2.40) и (2.43) он может быть записан в следующем виде

$$R = \sum_{j=1}^{j=n} k_p P_T, \quad (2.74)$$

где  $P_T$  - вектор окружных составляющих сил резания, порядок которого равен числу одновременно режущих зубьев фрезы;  $k_p$  - матрица коэффициентов возмущения, число строк в которой равно числу обобщенных координат в конечном элементе модели, а число столбцов равно числу одновременно режущих зубьев фрезы.

Матрица  $k_p$  может быть определена следующим образом

$$k_p = k_R G_2 H^{-1}, \quad (2.75)$$

где  $k_R$  - матрица коэффициентов при  $P_{Ti}$  в (2.40), ее порядок соответствует транспонированной матрице  $k_p$ .

Тогда окончательно систему уравнений рассматриваемой модели с учетом запаздывающих сил при автоколебаниях можно записать в следующем виде

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{Q} + B\dot{Q} + KQ &= \sum_{j=1}^{j=n} k_p P_T \\ T_p \dot{P}_T + P_T &= p \Delta S \end{aligned} \right\}, \quad (2.76)$$

где  $p$  - удельная сила резания;  $\Delta S$  - изменение площади среза, вызванное изменением обобщенных координат  $Q$  при автоколебаниях;  $T_p$  - постоянная запаздывания.

Постоянная запаздывания  $T_p$  соответственно равна  $[67,97]$

$$T_p = \frac{l_p}{V_s} , \quad (2.77)$$

где  $l_p$  - длина пути стружкообразования;  $V_s$  - скорость резания.

Изменение площади среза  $\Delta S_i$  для рассматриваемой модели связано не только с изменением толщины  $a_i$ , но и ширины  $b_i$  среза, вызваны изменением обобщенных координат модели  $Q$ . Эту связь можно описать зависимостью

$$\Delta S = k_1 Q + Q^T k_2 Q , \quad (2.78)$$

где  $k_1, k_2$  - матрицы коэффициентов, характеризующие изменение  $\Delta S$  в зависимости от изменения  $Q$ .

Полученные в (2.73) и (2.76) выражения теоретически описывают условия возбуждения автоколебаний и вынужденные колебания в рассматриваемой модели. Однако, эти системы уравнений являются очень громоздкими. Так, например, для модели, разбитой на пять элементов, они включают в себя около 40 уравнений. Решение подобных систем связано с большими вычислительными трудностями, что может привести к значительным погрешностям. Наличие в уравнениях запаздывания нелинейности, вызванной одновременным изменением и ширины, и толщины среза при взаимодействии упругой системы с процессом резания значительно усложняет ход решения. К тому же получить матрицы  $k_1$  и  $k_2$  для большого числа обобщенных координат достаточно сложно, при этом также могут иметь место большие погрешности. Необходимо на базе моделей (2.73) и (2.76) найти пути, которые позволили бы их упростить.

Опыт исследования динамики упругих систем [23,103,123] показывает, что наряду с численными методами в ряде случаев весьма целесообразным оказывается анализ типовых динамических моделей, позволяющий дать аналитическую оценку переменных, характеризующих динамическое состояние упругой системы. Это дает возможность связать в аналитическом решении конструктивные особенности модели и технологические параметры обработки. Это очень удобно для учета динамических факторов при выборе режимов резания, параметров режущего инструмента и точности обработки. Аналитические модели являются достаточно упрощенными, однако достоверно отражают наиболее существенные факторы, т.е. взаимодействие упругой системы с процессом резания.

Непосредственное численное решение дифференциальных уравнений (2.73) затруднительно в связи с их громоздкостью и связанностью между обобщенными координатами. Как было уже указано выше, в данной работе не ставится задача исследования сложных периодических режимов, однако экспертные оценки по выбору частоты вращения режущего инструмента сформировать необходимо. Это дает возможность несколько упростить модель. Существенное упрощение достигается путем введения главных координат [15]. В выражении (2.73) необходимо осуществить следующую замену. Вектор физических координат заменим на вектор нормальных координат согласно (2.68), матрицы  $M, K, B$  на  $M^*, K^*, B^*$  согласно (2.69), (2.70). Вектор обобщенных нормальных силовых параметров можно получить из выражения

$$R^* = V^T R \quad (2.79)$$

Рассмотрим формирование вектора  $R$  с течением времени. Силу резания можно разложить в гармонический ряд Фурье [62] по экспериментальным или расчетным точкам

$$R(t) = R_0 + \sum_{i=1}^{i=n} H_i \sin(ikt + \delta_i), \quad (2.80)$$

где  $i$  - номер гармоники;  $R_0$  - среднее значение силы;  $n$  - число учитываемых гармоник силы;  $H_i$  - амплитуда  $i$ -ой гармоники силы;  $\delta_i$  - фазовый сдвиг  $i$ -ой гармоники.

Входящие в (2.80) элементы можно определить следующим образом

$$\begin{aligned} R_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T R(t) dt ; & k &= n_* Z / 60 ; \\ H_i &= \sqrt{a_i^2 + b_i^2} ; & \operatorname{tg} \delta_i &= a_i / b_i ; \\ a_i &= \frac{2}{T} \int_0^T R(t) \cos(ikt) dt ; & & \\ b_i &= \frac{2}{T} \int_0^T R(t) \sin(ikt) dt , & & \end{aligned} \quad (2.81)$$

где  $T$  - период изменения силы резания;  $k$  - частота вынужденных колебаний;  $n_*$  - частота вращения фрезы;  $Z$  - число зубьев фрезы;  $R(t)$  - сила, вычисленная с помощью зависимости (2.40), заменив  $\psi$  на  $kt$ .

В реальных условиях фрезерования профиля турбинной лопатки обычно используют концевые фрезы с числом зубьев 4-8. В этом случае в резании, как правило, одновременно участвуют не менее двух зубьев [113]. Это увеличивает равномерность фрезерования и приближает характер изменения силы к гармоническому. Так, при фрезеровании шестизубой концевой фрезой при угле положения 25 градусов характер изменения элементов вектора силы незначительно отличается от гармонического (рис. 2.10). Это дает возможность максимально упростить



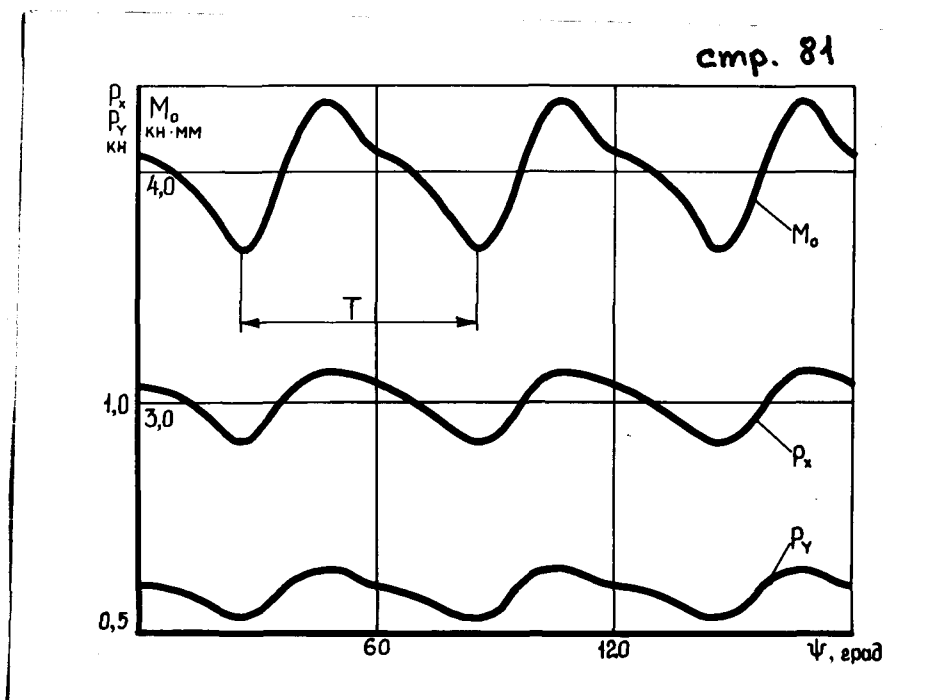


Рис. 2.10. Изменение составляющих силы резания, приведенной к продольной оси модели, при фрезеровании шестизубой концевой фрезой, угол положения  $25^\circ$ .

выражение (2.80)

$$R(t) = R_0 + H \sin kt \quad (2.82)$$

В выражении (2.82) отсутствует фазовый сдвиг, так как все составляющие силы, определенные в (2.40), имеют максимум и минимум при одном и том же значении угла положения. Для получения экспертных оценок по динамическому качеству обрабатываемой поверхности необходимо знать амплитуду и период вынужденных колебаний рассматриваемой модели. Для этого необходимо определить обобщенные нормальные координаты модели, амплитуда и фазовый сдвиг каждой из которых будут соответственно равны [15]

$$A_i = \frac{H_i / k_i^2}{\sqrt{(1 - \omega_i^2 / k_i^2)^2 + 4 n_i^2 \omega_i^2 / k_i^2}} ; \quad (2.83)$$

$$\delta_i = \arctg \frac{2 n_i \omega_i^2 / k_i^2}{1 - \omega_i^2 / k_i^2} ,$$

где  $m_i$  — коэффициент инерции в  $i$ -м нормальном контуре;  
 $\omega_i^2$  — квадрат собственной частоты в  $i$ -м нормальном контуре;  
 $n_i$  — параметр демпфирования в  $i$ -м нормальном контуре;  $H_i$  — амплитуда обобщенной силы в  $i$ -м нормальном контуре, полученная с учетом (2.40) и (2.68).

Тогда вектор физических обобщенных координат  $Q$ , определяющий динамическое качество обрабатываемой поверхности, будет соответственно равен

$$Q = (Q^*)^T V \quad (2.84)$$

Высота неровностей обрабатываемой поверхности, вызван-

ная вынужденными колебаниями, определяется амплитудой вектора  $Q$ .

В результате проведенных предварительных исследований и пробных экспериментов, выполненных в условиях ПО "Ленинградский Металлический завод" было установлено, что при фрезеровании лопаток, как правило, доминирующей является система лопатки, причем возбуждаются в основном главные формы колебаний [72]. Анализ упруго-инерционных характеристик самой лопатки показал, что смещение относительно оси минимальной жесткости и поворот вокруг продольной оси доминируют по отношению к другим смещениям. Учитывая эти особенности, можно существенно упростить динамическую модель (2.76). Упрощение достигается явным выделением доминирующих контуров. Введем ряд допущений в модель (2.76):

1. Предположим, что при возмущении системы во время обработки возбуждаются только первые формы колебаний. Это позволяет резко упростить динамическую модель, заменив ее моделью, состоящей только из одного элемента, первый узел которого жестко заделан, а ко второму узлу приведена масса (рис. 2.II).

2. Так как при исследовании существенным является взаимодействие упругой системы и неконсервативной силы резания, то в модели этот фактор необходимо учесть максимально чисто. Но крутильные и изгибные характеристики деформации лопатки являются связанными. Однако известно [14], что первые собственные формы колебаний в изгибных и крутильном контурах не оказывают существенного влияния друг на друга. Поэтому целесообразно исключить из модели связанность между обобщенными координатами. Это позволяет также упростить форму упру-

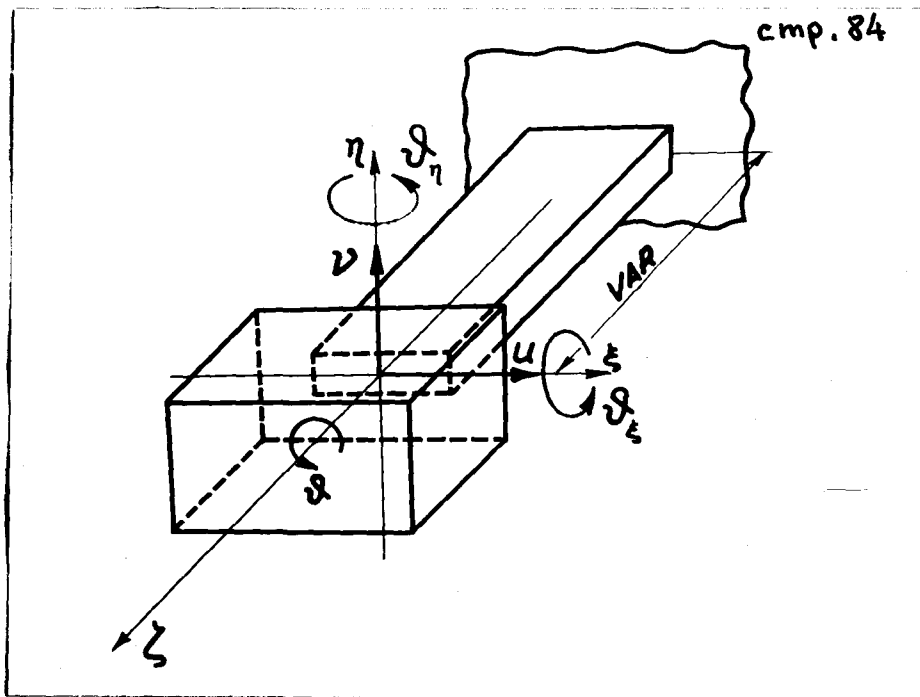


Рис. 2.II. Упрощенная динамическая модель турбинной лопатки.

гого элемента и выполнить его без естественной закрученности и изменения поперечного сечения.

3. Базовая динамическая модель, упрощенная согласно пп. 1 и 2 имеет пять обобщенных координат:  $\xi$  - поперечная деформация вдоль оси  $O\xi$ ;  $\eta$  - поперечная деформация вдоль оси  $O\eta$ ;  $\theta_z$  - угол поворота относительно оси  $Oz$ ;  $\theta_\eta$  - угол поворота относительно оси  $O\eta$ . Эти пять обобщенных координат можно разделить на три независимых контура:

- изгибный контур в плоскости  $\xi Oz$  - координаты  $\xi$  и  $\theta_\eta$ ;
- изгибный контур в плоскости  $\eta Oz$  - координаты  $\eta$  и  $\theta_\xi$ ;
- крутильный контур - координата  $\theta_z$ .

Рассмотрим соотношение жесткостей в направлении этих координат. Для этого представим основные геометрические параметры поперечных сечений турбинной лопатки (рис. 2.12). Жесткости в направлении  $\eta$  и  $\theta$  соизмеримы, а жесткость в направлении  $\xi$  более чем на порядок их превышает. Динамические расчеты собственных частот упрощенной модели для соотношения хорды и максимальной толщины сечения, равного шести, при различных вылетах упругого элемента показали (рис. 2.13), что в диапазоне 100+500 гц. при минимальной жесткости в направлении  $\eta$  1 кН/мм имеют место только изгибные колебания в направлении  $O\eta$  и крутильные колебания относительно оси  $Oz$ .

Таким образом, для исследования устойчивости невозмущенного движения при фрезеровании удлиненных маложестких заготовок (турбинных лопаток) можно рассмотреть двухчастотную динамическую модель. Она описывается системой дифференциальных уравнений (2.76) с учетом введенных допущений. Здесь вектор  $Q$  включает в себя

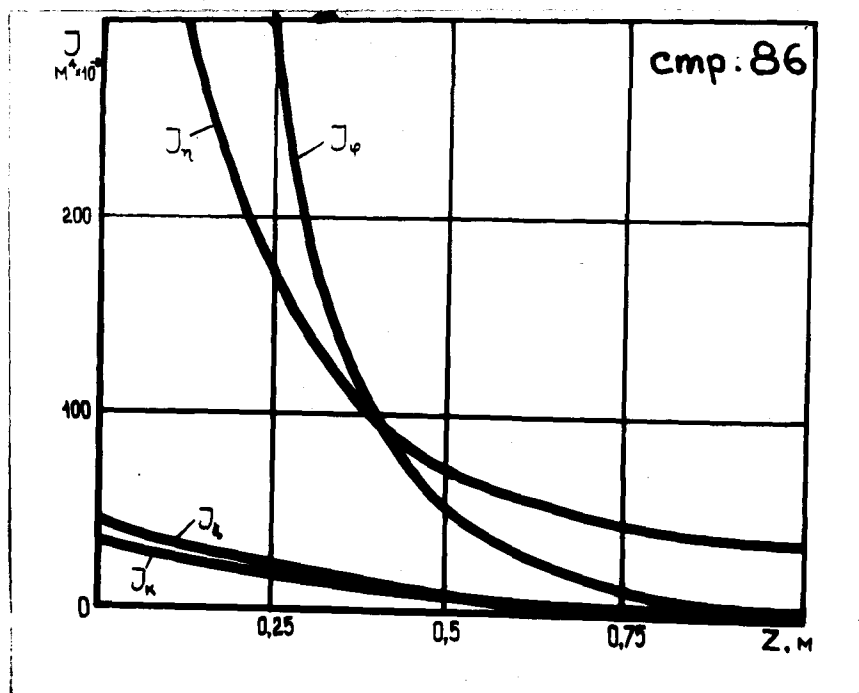


Рис. 2.12. Основные геометрические характеристики поперечных сечений рабочей лопатки 29 ступени ЦНД турбины К-300.

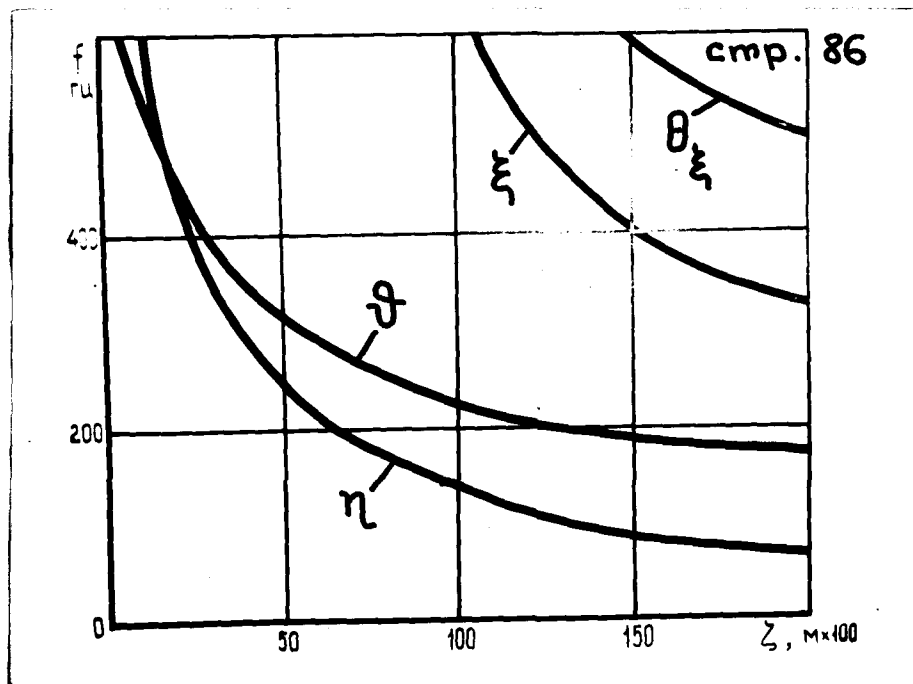


Рис. 2.13. Зависимость собственных частот упрощенной динамической модели лопатки от вылета упругого элемента.

$$Q = \{\eta \ \theta\}^T, \quad (2.85)$$

где  $\eta$  - нормальная координата, соответствующая первой форме изгибных колебаний лопатки;  $\theta$  - нормальная координата, соответствующая первой форме крутильных колебаний лопатки.

Матрицы  $M$  и  $K$  можно получить из выражений (2.68) для выбранных координат  $\eta$  и  $\theta$ . Матрица  $B$  формируется согласно выражению (2.70) для координат  $\eta$  и  $\theta$ . Матрица включает в себя

$$k_p = [k_y \ k_m]. \quad (2.86)$$

Здесь  $k_y$  и  $k_m$  можно получить из зависимостей (2.40). Вектор  $P_T$  остается без изменений.

Уравнения запаздывания, входящие в систему (2.76), для двухчастотной модели будут иметь вид

$$T_p \dot{P}_{Ti} + P_{Ti} = k^* (k_{\eta_i} \eta + k_{\theta_i} \theta + k_{1_i} \eta^2 + k_{2_i} \eta \theta + k_{3_i} \theta^2), \quad (2.87)$$

где  $k_{\eta_i}$ ,  $k_{\theta_i}$ ,  $k_{1_i}$ ,  $k_{2_i}$ ,  $k_{3_i}$  - коэффициенты при обобщенных координатах, характеризующие изменение площади среза для  $i$ -го зуба фрезы.

Значения коэффициентов в (2.87) можно выразить в зависимости от положения фрезы по отношению к заготовке (рис.2.II)

$$\begin{aligned} k_{\eta_i} &= a_i \cos \alpha + b_i \sin \alpha; & k_{\theta_i} &= L(b_i \sin \gamma - a_i \cos \gamma); \\ k_{1_i} &= \sin \alpha \cdot \cos \alpha; & k_{2_i} &= L(\cos \alpha \cdot \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma); \\ k_{3_i} &= L^2 \sin \gamma \cdot \cos \gamma, \end{aligned} \quad (2.88)$$

где  $a_i, b_i$  - мгновенные значения толщины и ширины среза;  
 $\alpha$  - угол положения фрезы;  $l$  - расстояние от оси  $OZ$  до точки приложения силы резания;  $\varphi$  - угол между  $l$  и осью  $O\xi$ ;  
 $\gamma = \varphi - \alpha$

Для упрощения анализа введем среднеинтегральную толщину среза  $[\Gamma_{120}]$

$$\delta_m = \varphi_z (1 - \cos \varphi_B) \cos \alpha / \varphi_B, \quad (2.89)$$

где  $\varphi_B$  - угол резания.

Величина  $\delta_m$  соответствует угол поворота фрезы

$$\varphi_m = aze \sin \left( \frac{\delta_m}{\varphi_z \cdot \cos \alpha} \right). \quad (2.90)$$

Выражения (2.89) и (2.90) позволяют достаточно просто определить параметры в (2.88) при обработке одновременно несколькими зубьями фрезы путем вычисления их средних значений и умножения на число одновременно режущих зубьев.

Запишем совместно систему дифференциальных уравнений рассматриваемой двухчастотной модели с уравнениями запаздывающих сил при автоколебаниях

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{\eta} + b_1\dot{\eta} + c_1\eta &= k_T P_T + k_r P_{rj} \\ \mathcal{J}\ddot{\theta} + b_2\dot{\eta} + c_2\eta &= k_{mT} P_T + k_{mr} P_{rj} \\ T_T \dot{P}_T + P_T &= -k_{\theta}^* \theta - k_{\eta}^* \eta; \\ T_r \dot{P}_r + P_r &= \mu P_T, \end{aligned} \right\}, \quad (2.91)$$

где  $m$  - приведенная масса изгибного контура;  $\mathcal{J}$  - приведенный момент инерции крутильного контура;  $c_1, c_2$  - приве-



денные жесткости в контурах;  $b_1, b_2$  - коэффициенты демпфирования в контурах;  $k_T, k_r$  - коэффициенты приведения сил  $P_T$  и  $P_r$  к продольной оси модели;  $k_{mT}, k_{mr}$  - коэффициенты приведения моментов сил  $P_T$  и  $P_r$  к продольной оси модели;  $k_\eta^*, k_\theta^*$  - линеаризованные коэффициенты возмущения в изгибном и крутильном контурах;  $P_T, P_r$  - полные касательная и нормальная составляющие силы резания, полученные из (2.40), (2.41), (2.43) с учетом (2.89), (2.90).

Коэффициенты  $k_T, k_r, k_{mT}, k_{mr}$  определяются с учетом зависимостей (2.40), (2.41) и (2.43). Коэффициенты  $k_\eta^*$  и  $k_\theta^*$  сформированы в результате линеаризации правой части выражения (2.87) с учетом (2.88)-(2.90)

$$\begin{aligned} k_\eta^* &= k_\eta + 2k_1 \eta_{ст} + 2k_2 \theta_{ст} ; \\ k_\theta^* &= k_\theta + 2k_2 \eta_{ст} + 2k_3 \theta_{ст} , \end{aligned} \quad (2.92)$$

где  $\eta_{ст}, \theta_{ст}$  - статические деформации в изгибном и крутильном контурах.

Введем следующие обозначения

$$\begin{aligned} T_{\eta_1} &= \frac{b_1}{c_1} ; T_{\theta_1} = \frac{b_2}{c_2} ; T_{\eta_2}^2 = \frac{m}{c_1} ; T_{\theta_2}^2 = \frac{J}{c_2} ; \\ h_T &= \frac{k_T}{c_1} ; h_r = \frac{k_r}{c_1} ; h_{mT} = \frac{k_{mT}}{c_2} ; h_{mr} = \frac{k_{mr}}{c_2} . \end{aligned}$$

Тогда система уравнений (2.91) примет вид

$$\left. \begin{aligned} T_{\eta_2}^2 \ddot{\eta} + T_{\eta_1} \dot{\eta} + \eta &= h_T P_T + h_r P_r ; \\ T_{\theta_2}^2 \ddot{\theta} + T_{\theta_1} \dot{\theta} + \theta &= h_{mT} P_T + h_{mr} P_r ; \\ T_T \dot{P}_T + P_T &= -(k_\eta^* \eta + k_\theta^* \theta) ; \\ T_r \dot{P}_r + P_r &= \mu P_T . \end{aligned} \right\} , \quad (2.93)$$

Для приведения (2.93) к операторной форме введем следующие обозначения

$$\begin{aligned} E_{\eta} &= T_{\eta_2} S^2 + T_{\eta_1} S + 1; E_{\theta} = T_{\theta_2} S + T_{\theta_1} S + 1; \\ E_T &= T_T S + 1; E_r = T_r S + 1, \end{aligned} \quad (2.94)$$

где  $S$  - оператор дифференцирования.

Запишем характеристическое уравнение системы (2.93) с учетом (2.94)

$$\begin{aligned} E_{\eta} E_{\theta} E_T E_r + h_{\tau} k_{\eta}^* E_{\theta} E_T E_r + h_{m\tau} k_{\theta}^* E_{\eta} E_T E_r + \\ + h_r k_{\eta}^* E_{\theta} E_T + h_{mr} k_{\theta}^* E_{\eta} E_T = 0. \end{aligned} \quad (2.95)$$

Исследование устойчивости решений на основе анализа корней характеристического уравнения (2.95) системы (2.93) дает возможность правильно оценить выбранные параметры обработки и уточнить их в случае необходимости. Для этого можно воспользоваться алгебраическим критерием Рауса [80]. Параметры, которые можно варьировать для построения областей устойчивости, следующие: скорость резания  $V_s$ , рабочая подача  $S_z$ , угол положения фрезы  $d$ , глубина резания  $t$ . Границу области устойчивости можно построить для любой пары перечисленных параметров. Здесь удобно воспользоваться алгоритмом, непользованным в работе [10]. Для этого в плоскости выбранных параметров  $d_1$  и  $d_2$  область  $D$  разбивается сеткой точек-узлов (рис. 2.14). Поиск точек области осуществляется путем контроля выполнения условий устойчивости в каждом из узлов сетки. Используя алгоритм обхода области Лосса [10],

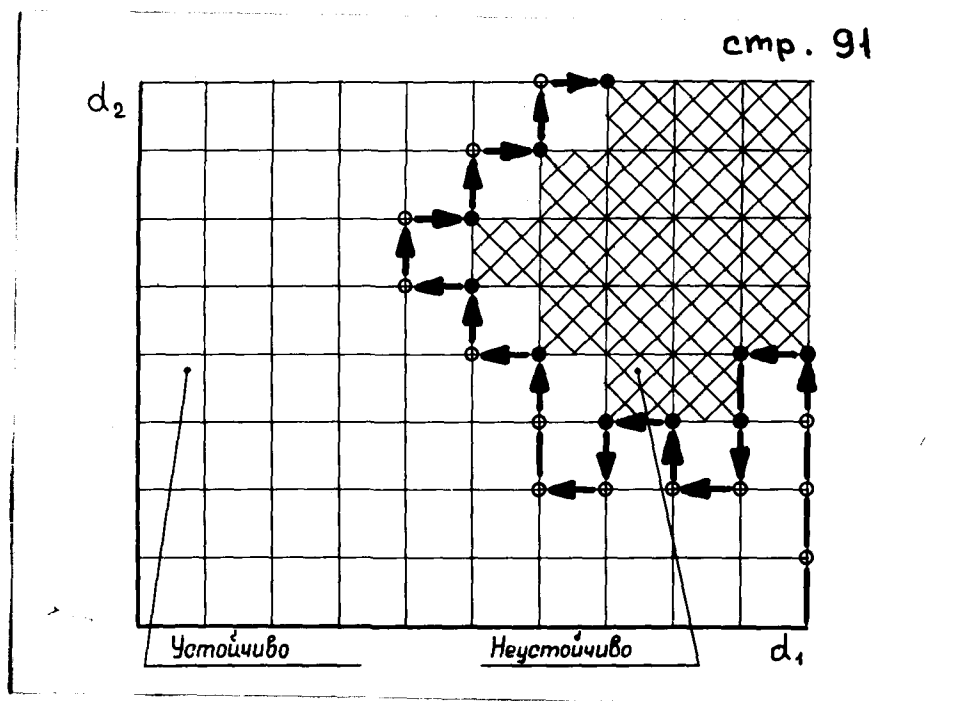


Рис. 2.14. Реализация алгоритма Ляпуна для построения границы области устойчивости в плоскости параметров  $d_1$  и  $d_2$ .

можно найти ее границы. Алгоритм дополнен направленным поиском в сетке точек-узлов особенностей в области устойчивости. Это дополнение отрабатывается, когда одним из параметров варьирования является угол положения фрезы. Режимы обработки выбираются таким образом, чтобы они находились внутри построенной области устойчивости.

При фрезеровании таких маложестких заготовок, как турбинные лопатки, доминирующей системой, как правило, является система лопатки. Автономное исследование ее устойчивости с помощью (2.95) дает реальные результаты. Однако, система лопатки взаимодействует с системой фрезы, которая в свою очередь также может оказывать влияние на устойчивость. Основные собственные частоты контуров заготовки и режущего инструмента, связанные через процесс резания, существенно различны. Расчет на устойчивость можно вести отдельно для обоих контуров. Это приближение оправдывается тем, что на границе каждой области устойчивости рассматривается лишь одна пара колебательных корней, а также тем, что при отсутствии между контурами других связей, кроме связи через процесс резания, собственная частота системы мало зависит от взаимодействия контуров  $[I_{20}, I_{21}]$ . Для анализа устойчивости системы фрезы существуют инженерные методики  $[I_{21}, I_{23}]$ .

Переход к базовой двухчастотной динамической модели позволил проанализировать условия взаимодействия упругой системы лопатки с процессом резания, причем инерционные, диссипативные и упругие приведенные параметры получены из обобщенной модели (2.76). В результате удалось осуществить аналитическое исследование устойчивости при фрезеровании маложесткой сложно-профильной заготовки концевой фрезой.

## 2.3. В ы в о д ы

В результате исследования статических и динамических характеристик при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок можно сформулировать следующие выводы:

I. Основными факторами, определяющими процесс формообразования при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок, являются:

- существенная податливость технологической системы, определяемая, в основном, специфическими свойствами заготовки;
- переменность припуска, обусловленная применяемыми способами получения заготовок;
- связанность между изгибными и крутильными деформациями в системе;
- переменность упруго-инерционных характеристик технологической системы.

2. В результате исследований, выполненных на базе предложенной динамической модели технологической системы (включающей маложесткую сложнопрофильную заготовку типа турбинной лопатки) установлено, что основными факторами, определяющими деформативность и динамические характеристики, являются:

- многосвязанность модели, обусловленная специфическим взаимодействием элементов технологической системы в процессе обработки маложесткой заготовки;
- особенности закрепления заготовки на столе станка при заданном расположении подвижных и неподвижных люнетов, что позволяет поставить задачу оптимального расположения указанных люнетов для заданных размеров и формы заготовки;
- принятая последовательность формообразования заготовки.

3. Построенная дискретная модель концевой фрезы дает возможность исследовать различные типоразмеры концевых и цилиндрических фрез, она обеспечивает учет влияния на ее деформацию следующих параметров:

- угол наклона винтовой канавки зуба;
- наличие конусной рабочей части;
- конструктивные особенности (форма поперечного сечения, наличие ступенчатых участков).

4. Разработанный алгоритм перераспределения припуска заготовки позволил программно перераспределять припуск путем введения переменной эквидистанты, рассчитываемой по замерам в контрольных сечениях, что дало возможность адаптировать форму профильной части заготовки к ее деформативности и условиям формообразования при резании.

5. Построенная матрица упругой заделки обеспечила учет в модели податливости системы крепления заготовки и фрезы, а также автоматизировать ввод граничных условий с учетом специфических особенностей закрепления.

6. Построенные векторы сосредоточенных и поверхностных сил обеспечили приведение силы резания и технологических остаточных напряжений к дискретной модели, что позволило осуществить совместный учет деформирующей способности силы резания и технологических остаточных напряжений на деформативность маложесткой заготовки.

7. Сформированный вектор деформации в упругой технологической системе при фрезеровании маложесткой заготовки определил параметры деформативности в модели и условия обеспечения заданной точности обработки при максимальной производительности.

8. Переход к двухчастотной динамической модели технологической системы с приведенными обобщенными упруго-инерционными и диссипативными характеристиками дал возможность связать в аналитическом решении конструктивные особенности модели и технологические параметры обработки.

9. В результате выполненного анализа устойчивости невозмущенного движения при фрезеровании маложестких сложно-профильных заготовок построены границы области устойчивости для различных варьируемых технологических параметров обработки, что позволило уточнить, адаптировать режимы резания с учетом динамических характеристик технологической системы.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ МАЛОЖЕСТКИХ ЗАГОТОВОК

#### 3.1. Тестирование основных программных алгоритмов

Разработанный алгоритм расчета жесткости турбинных лопаток является общим для прямых стержней произвольного вида, в том числе и тонкостенных с несимметричным поперечным сечением. Он был оттестирован на решенных классических задачах о деформациях прямых и закрученных стержней, в том числе тонкостенных.

Рассмотрим в качестве тестовой задачи расчет деформации тонкостенной широкополной балки под действием перерезывающей силы, приложенной с эксцентриситетом по отношению к центру изгиба. Аналитическое решение данной задачи было получено Власовым В.З. [25]. При расчете по разработанному алгоритму балка, длина которой 2,7 м, была равномерно разбита на 10 конечных элементов. Эксперимент показал (рис. 3.1), что результаты расчета изгибных деформаций практически совпадают с полученными аналитически. По крутильным деформациям имеются отличия до 8 %, однако результаты конечноэлементного расчета лучше приближаются к контрольным экспериментальным точкам, особенно ближе к сечениям, в которых наложены граничные условия и имеет место стесненность кручения. Высокая степень совпадения результатов аналитического и приближенного конечноэлементного расчетов дает основание утверждать, что разработанная модель достаточно корректно отображает связь между деформирующей способностью сосредоточенных сил и деформативнос-



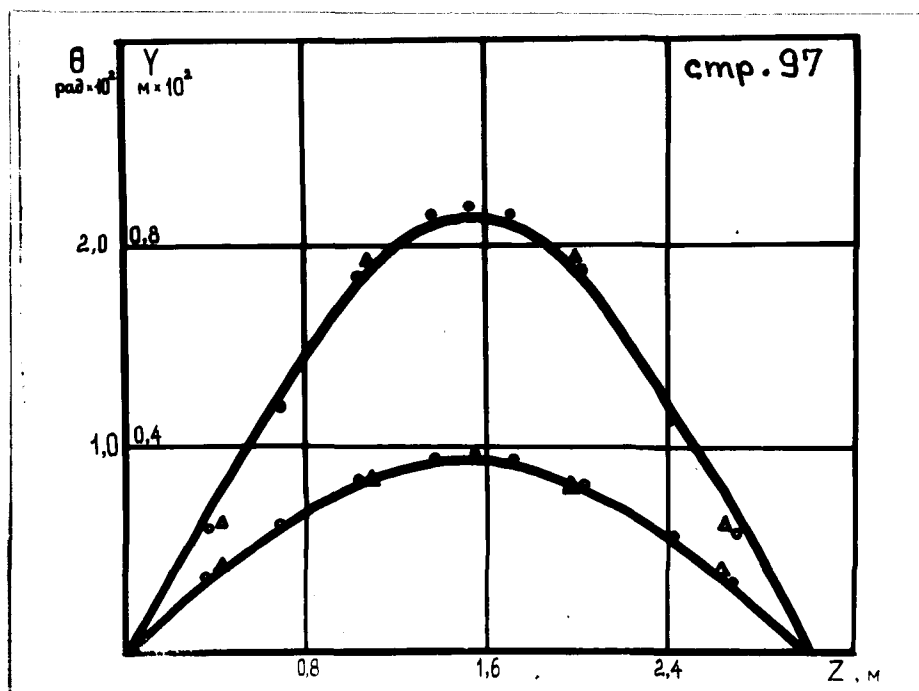


Рис. 3.1. Результаты тестирования алгоритма расчета жесткости лопаток на точном решении задачи о деформации широкополной тонкостенной балки:  
 точное решение;  
 расчет по разработанному алгоритму;  
 контрольные экспериментальные точки;

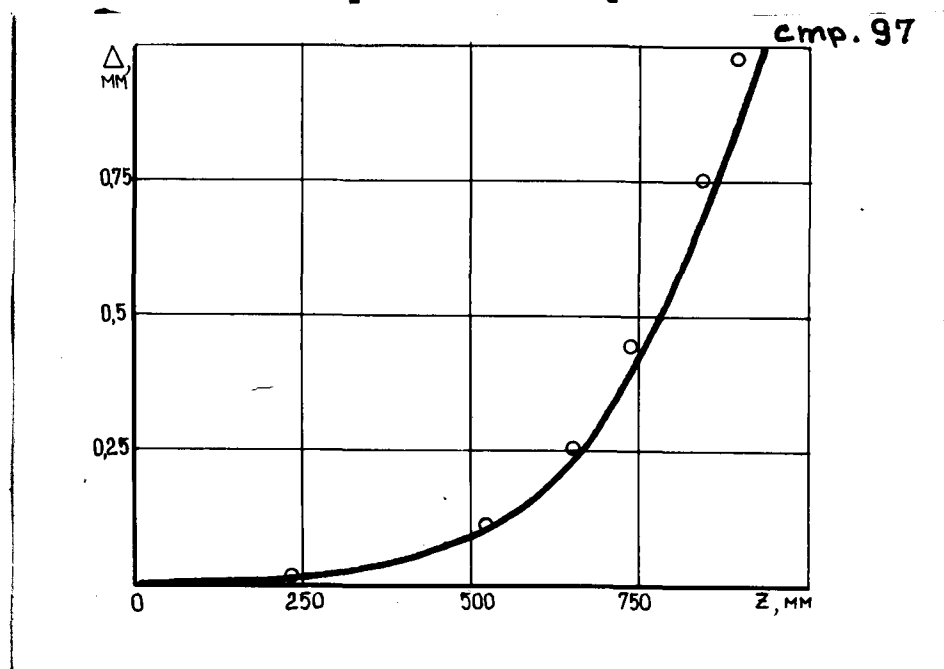


Рис. 3.2. Сравнительные результаты расчета остаточных деформаций профильной части турбинной лопатки 29 ступени ЦНД турбины К-300 после фрезерования  
 расчет по разработанному алгоритму;  
 экспериментальные данные В.К. Кузишина.

тью маложесткой заготовки.

Разработанная модель была оттестирована также на задачах о деформации тонкостенных закрученных стержней от действия поверхностных сил. Так, в работах [8,68,70,89] приведены результаты экспериментального и расчетного определения остаточных деформаций профильной части турбинной лопатки 29 ступени турбины К-300/240 после различных операций механической обработки. По исходным данным этих задач были произведены расчеты по разработанному алгоритму. Интегральные остаточные напряжения для операции кругового фрезерования профильной части лопатки со стороны наружного и внутреннего профиля определялись следующим образом [48]

$$q_{v,n} = 296 V_s^{0,1} S_z^{-0,04} t^{-0,01} - 500. \quad (3.1)$$

Профильная часть лопатки была разбита на 23 конечных элемента в сечениях, заданных чертежом. Сравнительный анализ результатов расчета по разработанному алгоритму и экспериментальных данных, полученных Кузюшиным В.К. [68] показал (рис. 3.2), что остаточные деформации профильной части лопатки со стороны головной части отличаются не более, чем на 14%, что является вполне допустимым. Из этого можно сделать вывод, что разработанный алгоритм позволяет достаточно корректно учитывать действие деформирующей способности поверхностных остаточных напряжений на деформативность турбинных лопаток.

### 3.2. Экспериментальное исследование жесткости турбинных лопаток

Для окончательной проверки теоретических исследований упругих характеристик маложестких заготовок было проведено экспериментальное исследование жесткости частично обработанных турбинных лопаток. Для измерения была взята рабочая лопатка 29 ступени турбины К-300/240 со следующими характерными размерами. Длина  $L = 960$  мм, максимальная хорда поперечного сечения  $b = 150$  мм, максимальная толщина профиля в корневом сечении  $\delta_1 = 21$  мм, в головном сечении  $\delta_{24} = 4$  мм. Эксперимент проводился на вертикально-фрезерном станке модели СФ-15 (рис. 3.3). Лопатка, обработанная частично с припуском 0,4 мм, а частично с припуском 1,5 мм. Закреплена со стороны хвостовой части в патрон делительной головки, установленной на столе станка, а со стороны головной части — в упорном центре, также установленном на столе станка. Для передачи тарированного усилия использован динамометр ДОСМ-300, установленный в шпинделе станка. Деформация лопатки фиксировалась индикатором часового типа. В ходе эксперимента координаты  $X$  и  $Y$  станка, а также угол поворота делительной головки устанавливались таким образом, чтобы нормаль к измеряемой точке совпала с вертикальной осью станка (рис. 3.4). Индикатор устанавливался на кронштейне с противоположной стороны профильной части так, чтобы его ось совпала с осью шпинделя станка (рис. 3.5). Кронштейн с индикатором закреплен на вертикальных направляющих станка с помощью прижимов (рис. 3.6). Измерение деформации лопатки осуществлялось под действием тарированной силы, направленной по нормали к измеряемой точке в че-

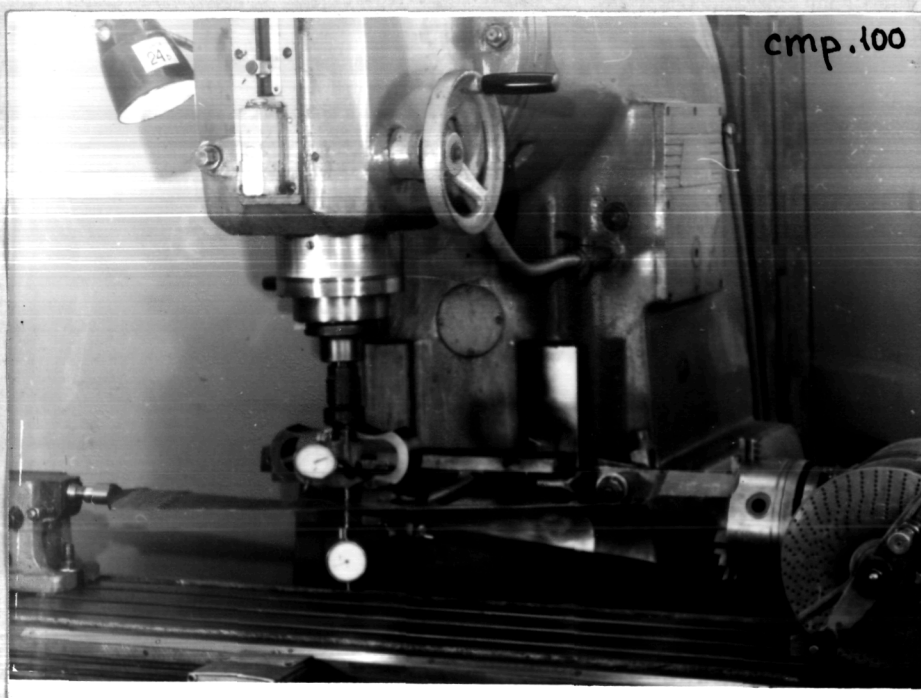


Рис. 3.3. Общий вид экспериментальной установки для измерения жесткости турбинных лопаток

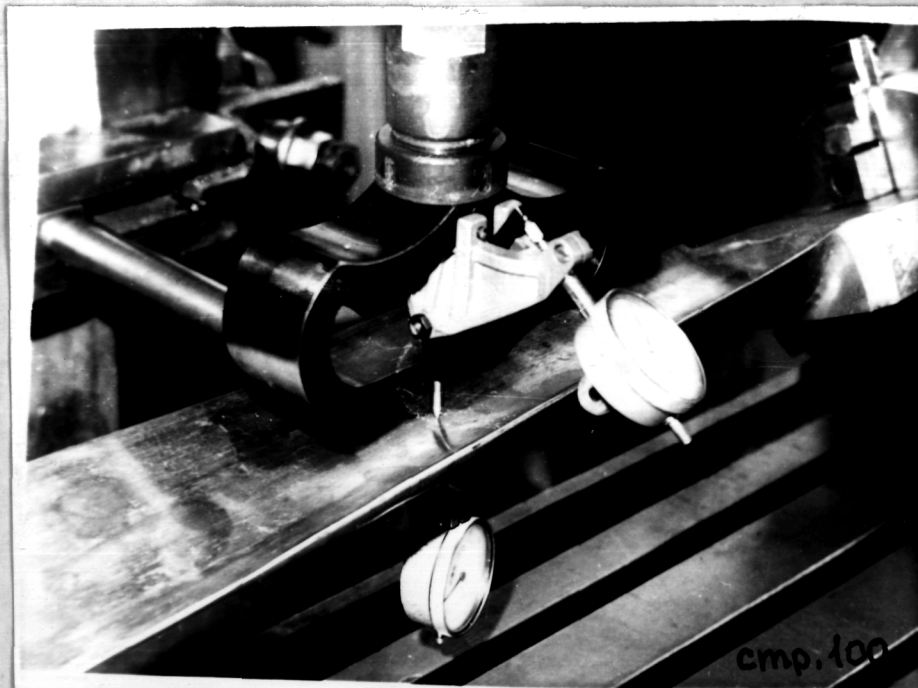


Рис. 3.4. Измерение жесткости лопатки в заданной точке.

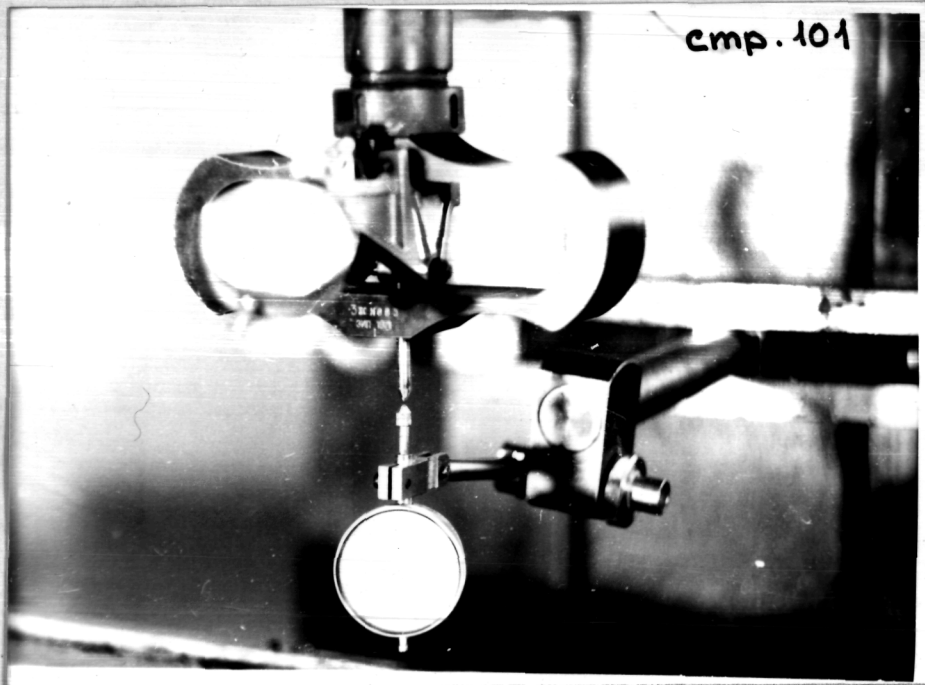


Рис. 3.5. Настройка индикатора перед экспериментом.

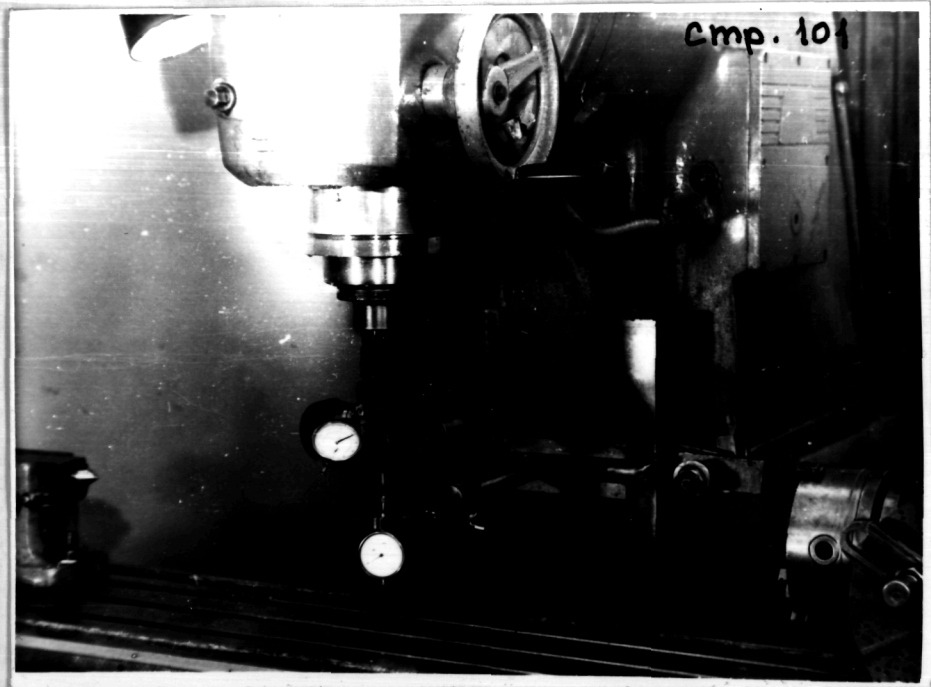


Рис. 3.6. Крепление кронштейна с индикатором к вертикальному направляющему станка.

тырех характерных сечениях профильной части лопатки. В каждом сечении измерение осуществляли по десяти точкам (рис.3.7), распределенным соответствующим образом со стороны внутреннего и наружного профиля по пять в каждом. Это дало возможность промоделировать как изгибные, так и изгибно-крутильные деформации лопатки. Результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных по деформациям лопатки в контролируемых сечениях приведены на рис. 3.9-3.10. Максимальные отклонения результатов эксперимента и расчетных данных не превышали 18 %.

На основании выше изложенного можно сказать, что расчет жесткости лопаток при действии различных силовых факторов, а также с учетом частично снятого припуска, показал хорошую сопоставимость, с результатами тестирования и экспериментального исследования. Это позволяет использовать данный алгоритм для жесткостных расчетов турбинных лопаток, а также и ряда других маложестких заготовок при совместном действии приведенных силовых факторов.

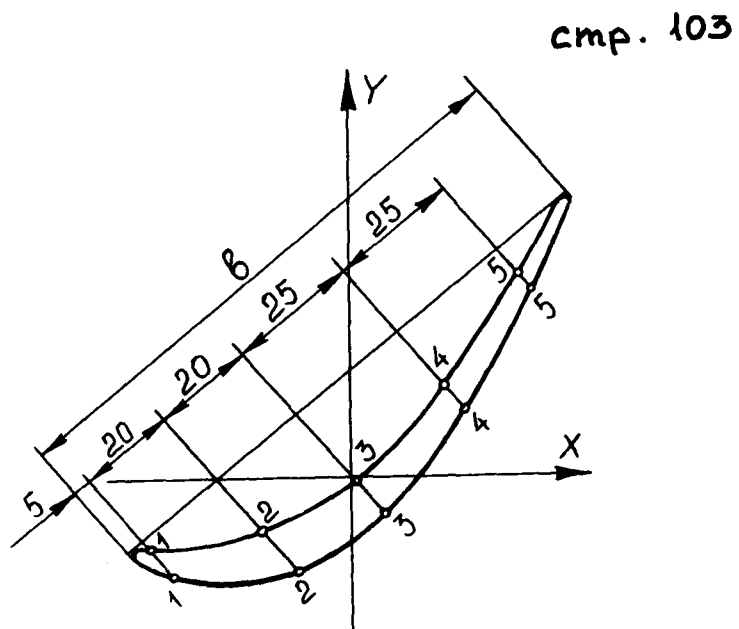


Рис. 3.7. Контрольные точки в измеряемых сечениях лопатки.

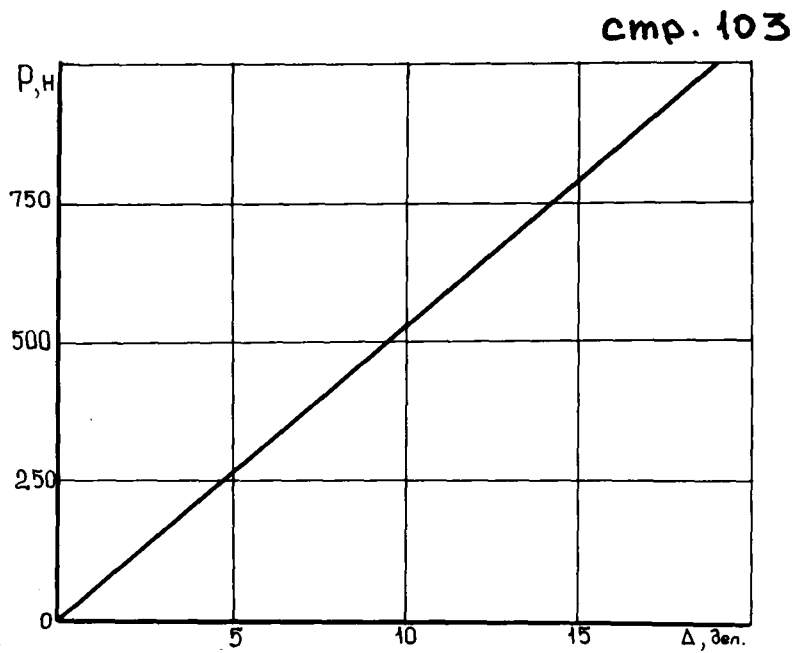


Рис. 3.8. Тарировочный график динамометра ДОСМ-3000.

стр. 104

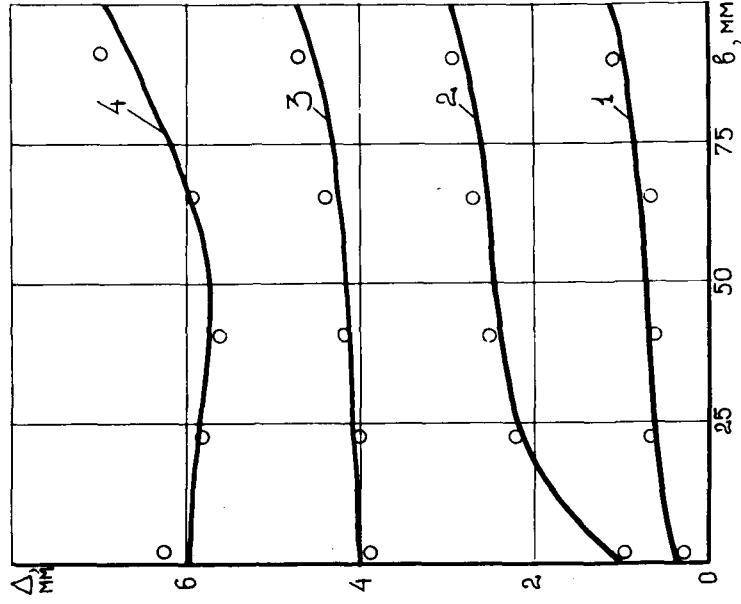


Рис. 3.10. Результаты теоретических и экспериментальных исследований жесткости лопатки 29 ступени (наружный профиль).

стр. 104

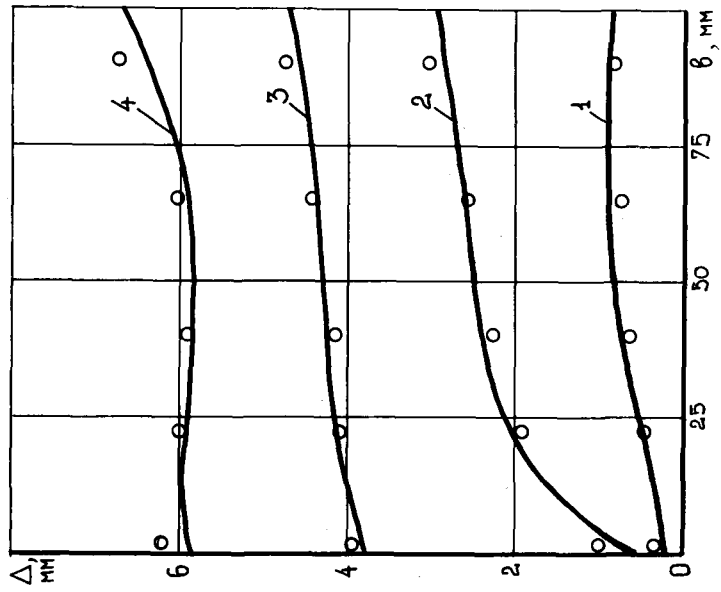


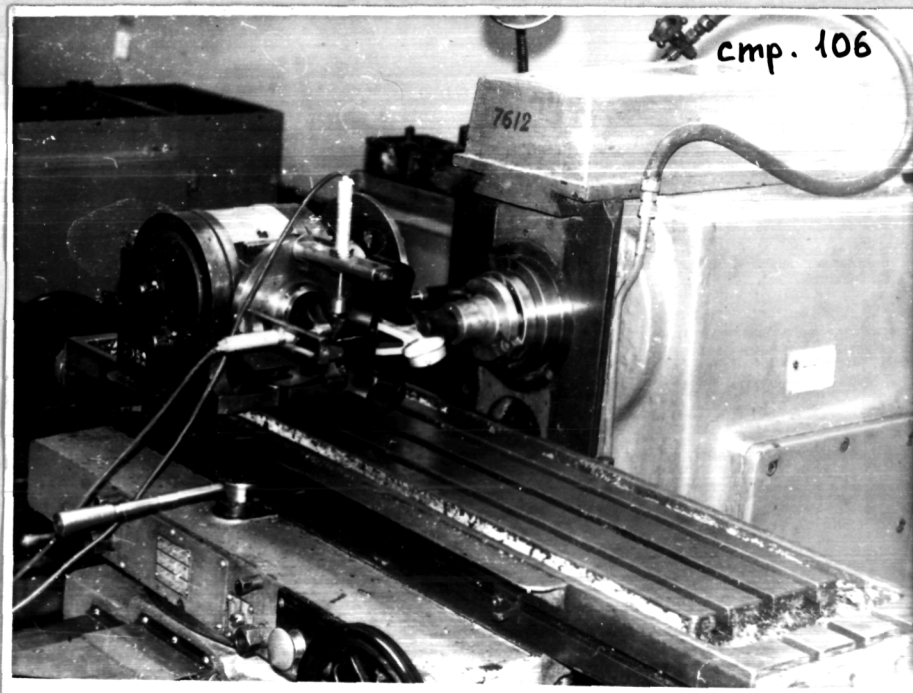
Рис. 3.9. Результаты теоретических и экспериментальных исследований жесткости лопатки 29 ступени (внутренний профиль).



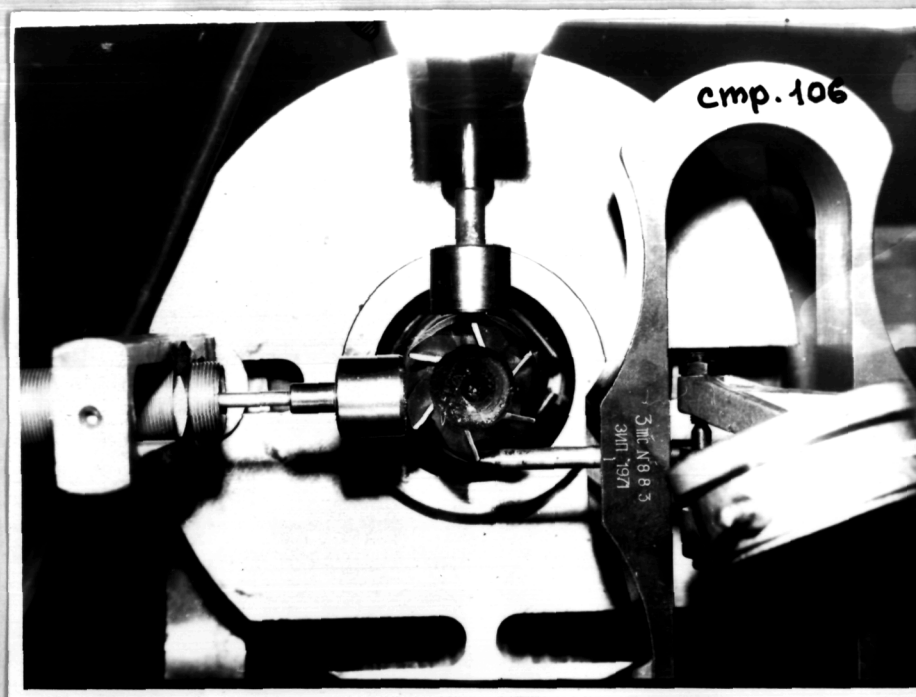
### 3.3. Экспериментальное исследование жесткости концевых фрез

Для экспериментальной проверки алгоритма расчета жесткости концевых фрез была разработана экспериментальная установка, позволяющая исключить при исследовании влияние податливости элементов станка (рис. 3.11,а). Конструктивно она выполнена следующим образом. На цилиндрическую часть делительной головки, размещенной на столе станка, установлен фланец, который привинчен к ней радиальными винтами. Фланец имеет четыре паза - два радиальных и два продольных (рис. 3.11,б), в которые устанавливаются штанги с измерителями. Пазы выполнены таким образом, что обеспечивается доступ для измерения практически любых концевых и торцовых фрез, а также сверл. Штанга имеет продольный паз для установки на требуемой высоте измерителей - датчика перемещений, который крепится на штанге гайками (рис. 3.12,а). В конусную часть делительной головки устанавливают исследуемую фрезу. Для исключения дополнительных погрешностей на торцовую часть фрезы можно установить кольцо. Для обеспечения плотности контакта между кольцом и штоком датчика на шток установлена магнитная головка. Магнитные головки позволяют осуществлять измерения и без кольца. Погрешность при этом не превышает 3 %. Штанга с установленным на ней измерителем крепится в нужном положении на фланце при помощи гайки. Для передачи тарированного усилия используется динамометр ДОСМ-3000, закрепленный в шпинделе станка.

Используемая экспериментальная аппаратура: динамометр ДОСМ-3000. Тарировочный график представлен на рис. 3.8. Измеритель - датчик перемещений ДП-3 индуктивного типа. Макси-

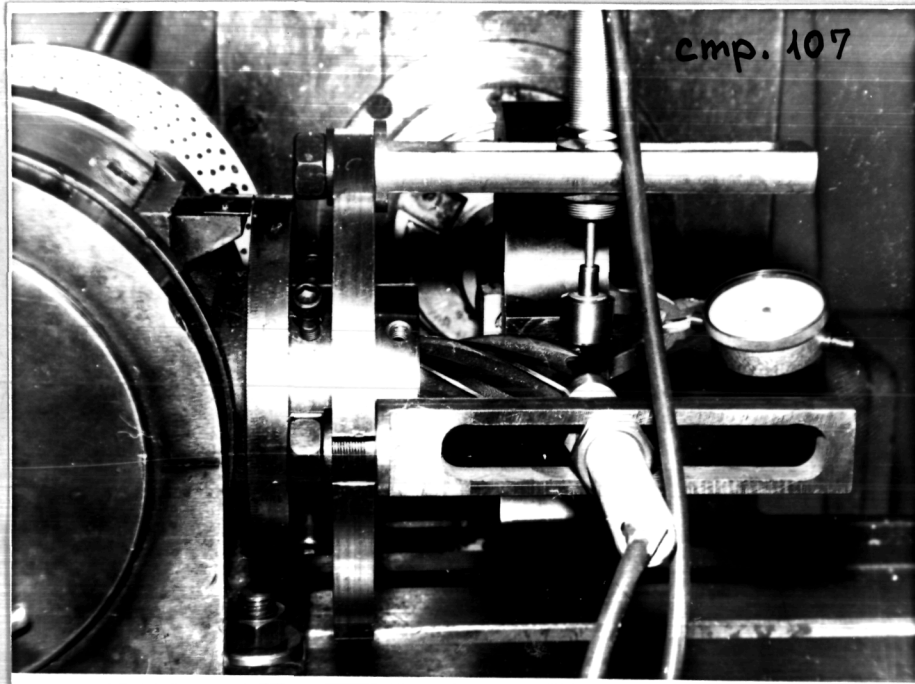


а)

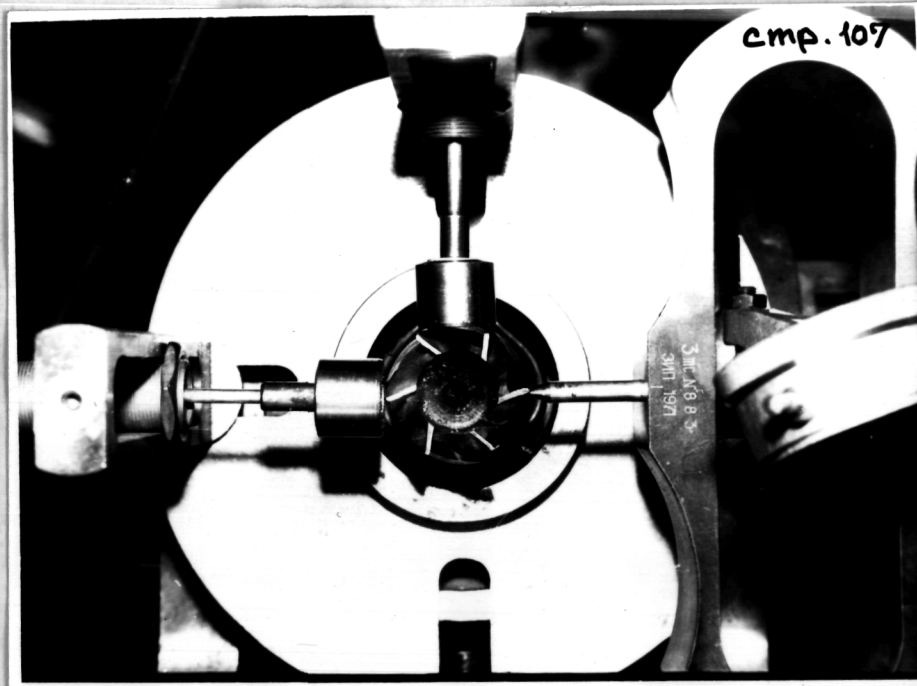


б)

Рис. 3.II. Измерение деформаций концевой фрезы от действия окружной составляющей силы резания.



a)



б)

Рис. 3.12. Измерение деформаций концевой фрезы от действия радиальной составляющей силы резания.

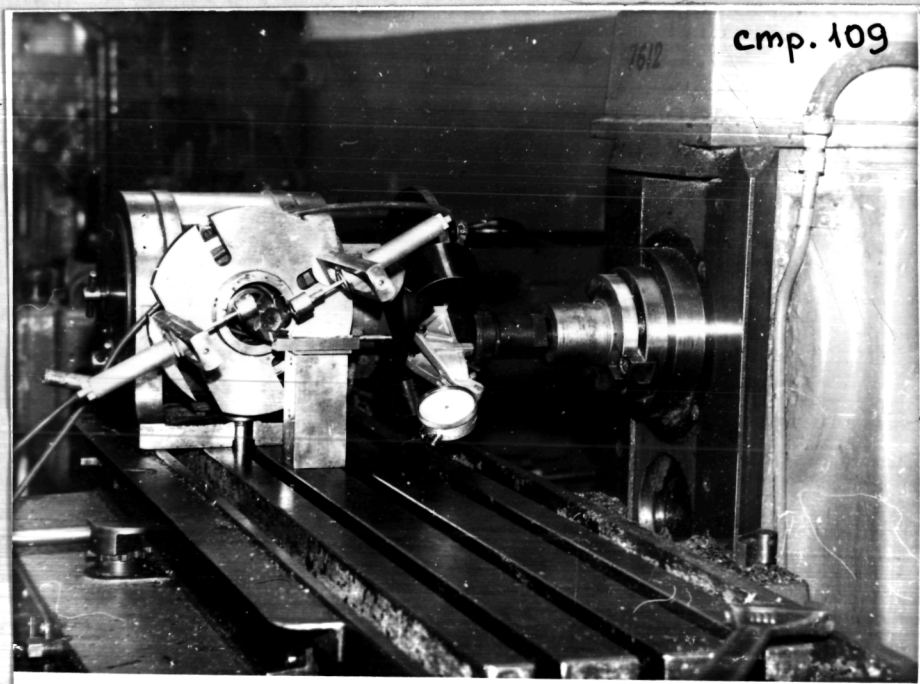
мальная частота входного сигнала 120 гц. Усилитель – ВИ6-5МА постоянного тока, число каналов – шесть. Блок амперметров – 4 микроамперметра с диапазоном измерения 0+300 мкм. Осциллограф – Н-117, число каналов 12. Необходимая метрологическая информация об использованных приборах приведена в Приложении 4.

В ходе эксперимента моделировалось действие силы резания на зуб фрезы. Для этой цели были разработаны четыре схемы измерения, позволяющие, исходя из принципа суперпозиции, рассмотреть отдельно действие составляющих силы резания на различные характеристики деформации фрезы (рис. 3.11-3.13):

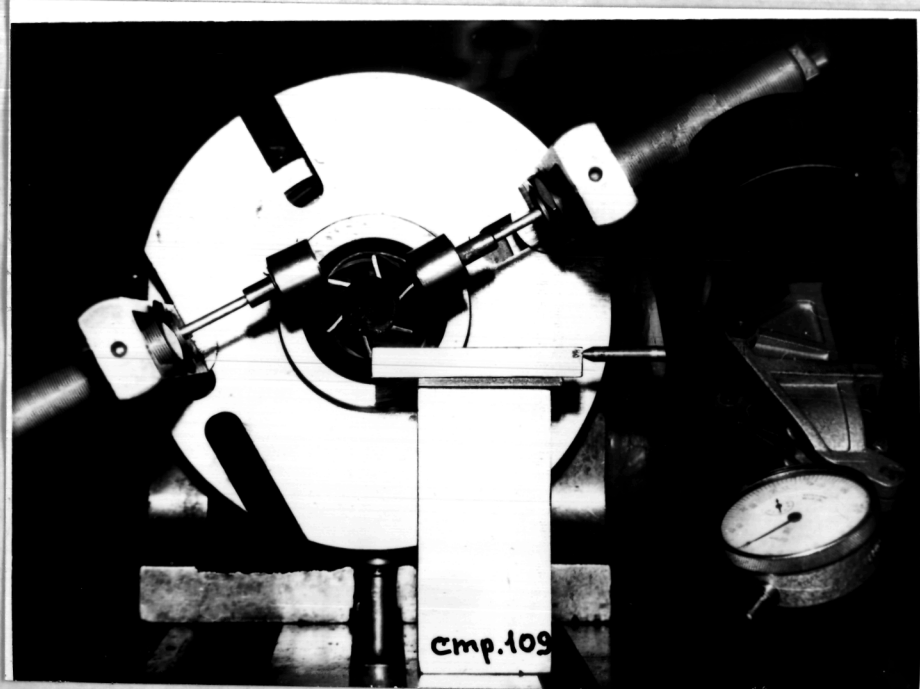
- 1 – действие окружной составляющей силы резания (рис. 3.11, а, б)
- 2 – действие радиальной составляющей силы резания (рис. 3.12, а, б);
- 3 – действие крутящего момента (рис. 3.13, а, б);
- 4 – совместное действие перечисленных силовых параметров.

Установка работает по следующей схеме. Шпиндель горизонтальнофрезерного станка через динамометр передает тарированное усилие на зуб фрезы по одной из четырех схем эксперимента. Фреза деформирует и воздействует на штоки датчиков перемещений. полученные сигналы усиливаются усилителем и подаются на блок амперметров или шлейфный осциллограф. Непосредственно перед экспериментом была проведена тарировка датчиков перемещений (рис. 3.14).

Эксперимент проводили на концевых фрезах различных типоразмеров с различным числом зубьев. В качестве приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований для концевой фрезы со следующими параметрами: радиус фрезы  $R = 16$  мм; число зубьев  $Z = 6$ ; высота зуба  $h_3 = 5$  мм; радиус



а)



б)

Рис. 3.13. Измерение деформаций концевой фрезы от действия крутящего момента.

стр. 110

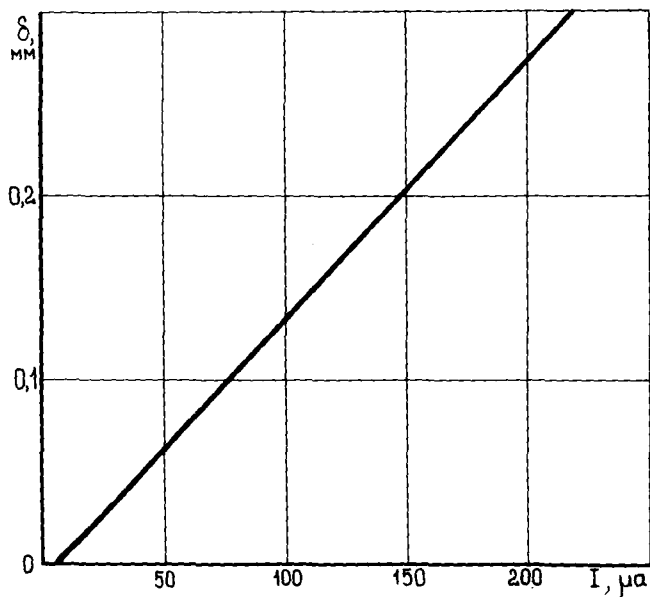


Рис. 3.14. Тарировочный график датчика перемещений ДП-3.

стр. 110

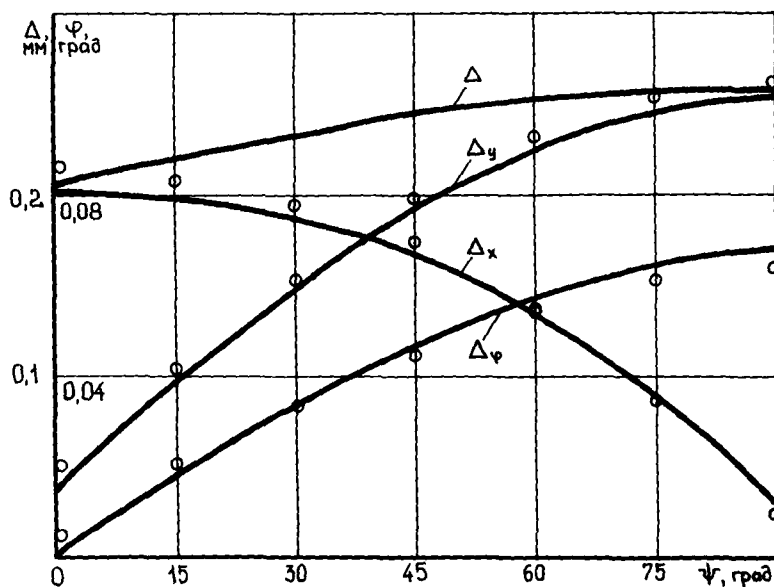


Рис. 3.15. Результаты теоретического и экспериментального исследования жесткости концевой фрезы:  
 расчет по предложенному алгоритму;  
 эксперимент.

сопряжения у корня зуба  $r = 2,5$  мм; ширина фаски по задней поверхности  $h = 3$  мм; передний угол  $\gamma = 10^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 12^\circ$ ; угол между передней поверхностью и тыльной частью зуба  $\vartheta = 60^\circ$ ; радиус тыльной части зуба  $R_1 = 19$  мм; длина рабочей части  $L_p = 100$  мм; длина цилиндрического пояса  $l_{ц} = 15$  мм; диаметр цилиндрического пояса  $D_{ц} = 24$  мм; длина выступающего конического участка  $l_{к} = 10$  мм; диаметр выступающей части (конического участка)  $D_{к} = 34$  мм; материал рабочей части - Р6М5; материал нерабочей части - Сталь 45. Сравнительные результаты экспериментального и теоретического исследований по данной фрезе приведены на рис. 3.15.

Результаты экспериментального и теоретического исследования показали, что наличие угла наклона режущих кромок ведет к связанности между изгибными деформациями, а также между изгибными и крутильными деформациями. Форма поперечного сечения фрезы существенно сказывается на ее жесткости, таким образом имеется возможность оптимизации геометрии режущего инструмента. Погрешности между результатами экспериментального и теоретического исследования жесткости концевых фрез не превысили 14 %. Это свидетельствует о том, что разработанный алгоритм достаточно корректно учитывает связь между деформирующей способностью сил резания и деформативностью режущего инструмента.

### 3.4. Экспериментальное исследование динамических параметров при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок

#### 3.4.1. Описание экспериментального стенда и расчет его параметров

С целью экспериментального исследования разработанной динамической модели при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок был спроектирован и изготовлен динамический стенд (рис. 3.16). Он достаточно полно характеризует динамическую модель турбинной лопатки. Стенд состоит (рис. 3.18 - 3.19) из основания, упругого элемента, крышки и исследуемого образца. Основание размещается на столе станка и закрепляется винтами, установленными в нижние или боковые пазы основания в зависимости от модели станка. В продольный паз основания устанавливается упругий элемент, который закрепляется крышкой, привинченной к основанию болтами. На упругий элемент устанавливается исследуемый образец и закрепляют его четырьмя винтами. Упругий элемент выполнен в виде бруса с прямоугольным поперечным сечением. Образец и упругий элемент изготовлены из материала, соответствующего материалу исследуемой маложесткой заготовки. Фреза установлена в шпинделе станка, который можно разворачивать по отношению к столу станка на заданный угол. Для фиксирования смещений при резании упругий элемент оклеен тензодатчиками (рис. 3.20-3.21). Схема включения тензодатчиков (рис. 3.17) обеспечивает раздельное фиксирование смещений в направлении изгибной деформации по оси  $O\eta$  и угла поворота относительно оси  $O\zeta$ . Датчики 1 и 2 включе-



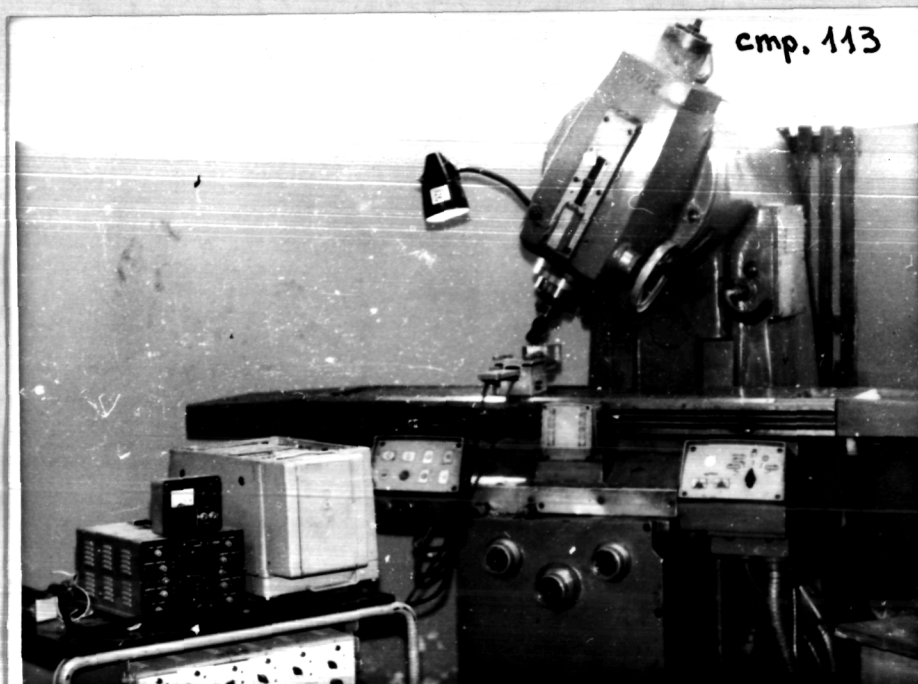


Рис. 3.16. Общий вид экспериментальной установки для исследования динамических характеристик при фрезеровании маложестких заготовок.

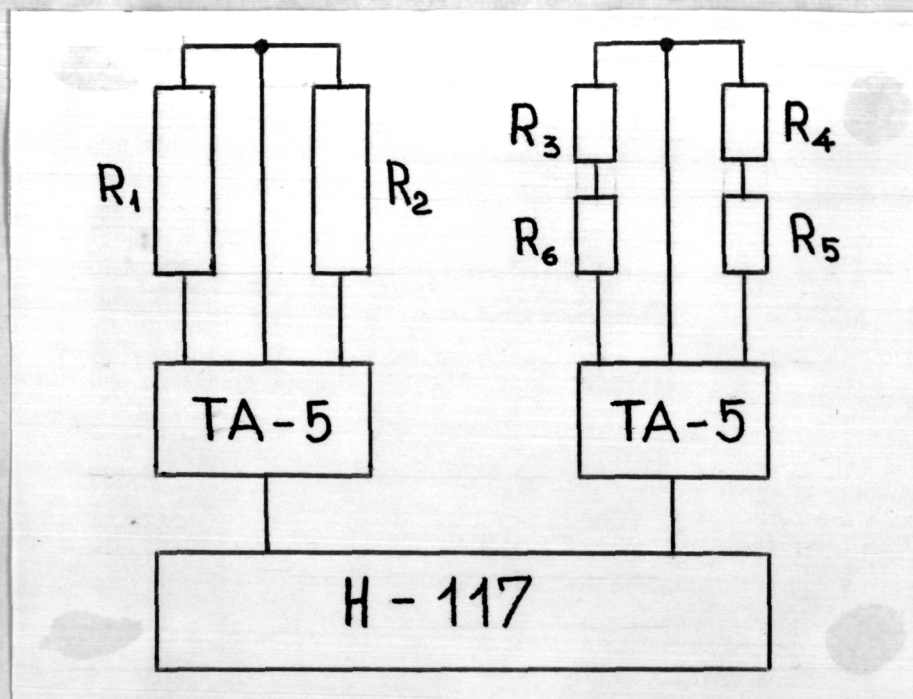


Рис. 3.17. Схема включения измерительной аппаратуры.

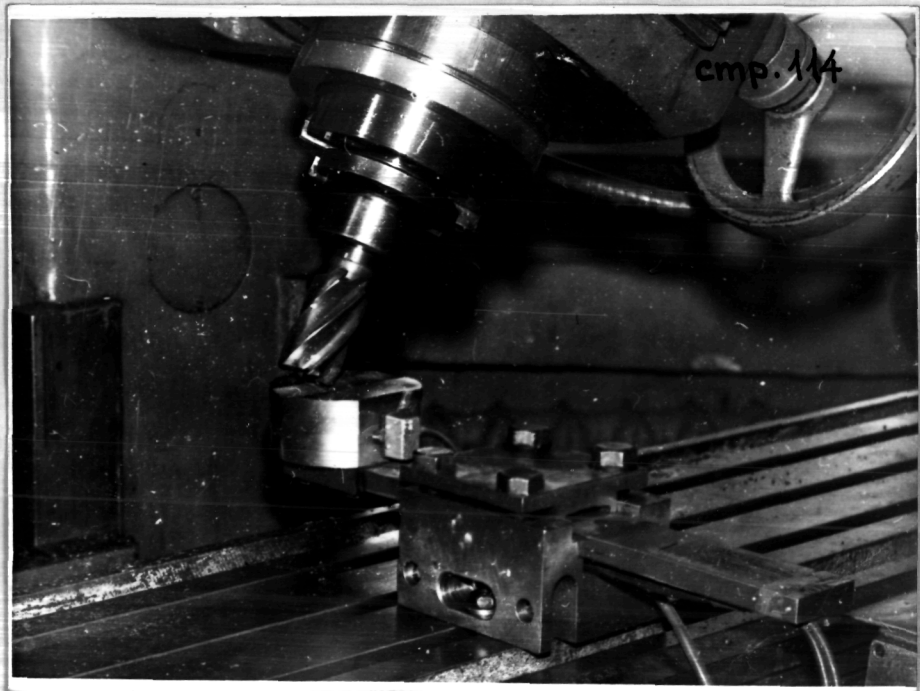


Рис. 3.18. Общий вид двухчастотного динамического стенда

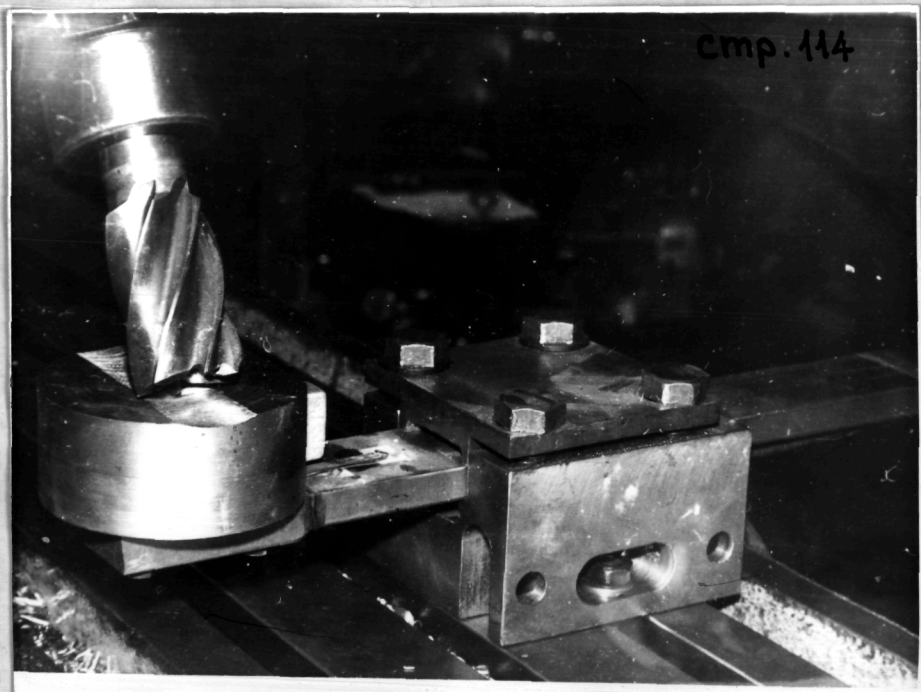


Рис. 3.19. Общий вид двухчастотного динамического стенда.

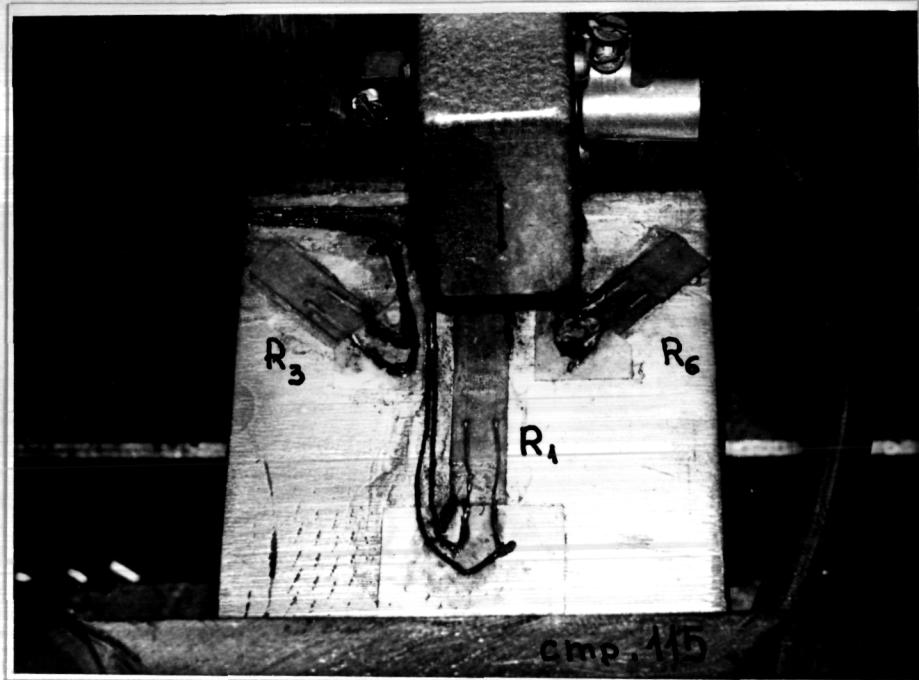


Рис. 3.20. Размещение тензодатчиков на упругом элементе (вид сверху).

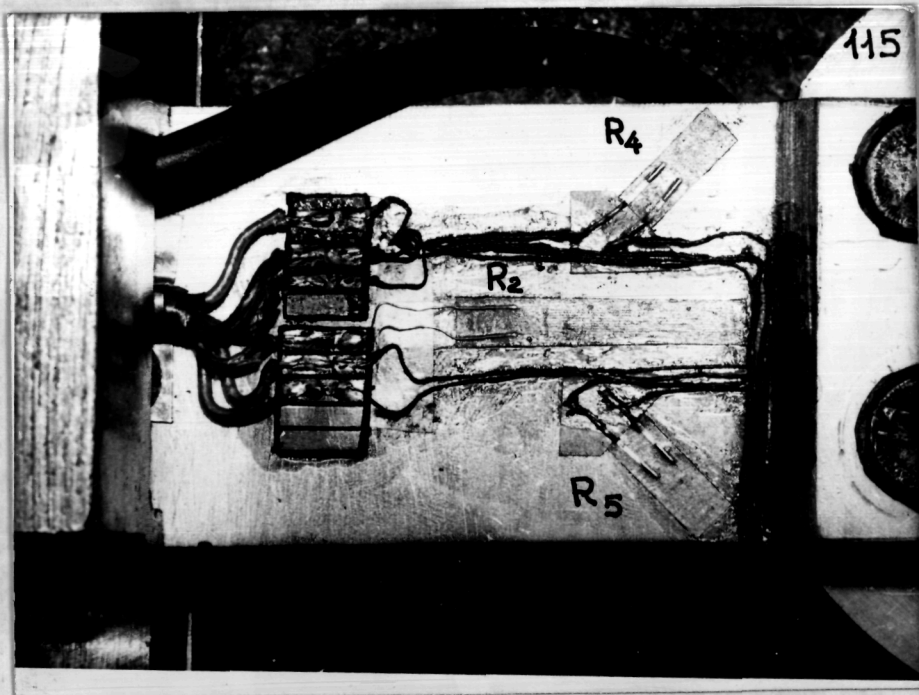


Рис. 3.21. Размещение тензодатчиков на упругом элементе (вид снизу).

ны в полумостовую схему и работают в изгибном контуре. Датчики 3, 4, 5, 6 также включены в полумостовую схему, причем датчики 3 и 6 в одном плече, а датчики 4 и 5 – в другом; они работают в крутильном контуре. Для фиксирования на стенде смещений в изгибном и крутильном контурах к нему подключены тензостанция ТА-5 и шлейфный осциллограф Н-117. Схема включения приведена на рис. 3.16. Тарировка стенда осуществлена для вылетов упругого элемента от 50 до 110 мм и для двух видов образцов. Статическую тарировку осуществляли при помощи динамометра ДОСМ-3000, а также двух индикаторов, установленных на кронштейне с магнитным основанием. Тарировочные графики приведены на рис. 3.24. Динамическую тарировку осуществляли ударом по образцу молотком с резиновым наконечником так, чтобы возбудить изгибный и крутильный контуры. По осциллограммам собственных колебаний (рис. 3.23) были подсчитаны логарифмические декременты для изгибного и крутильного контуров.

Для проведения экспериментальных исследований необходимо иметь достаточно полную расчетную информацию о статических и динамических параметрах стенда. Число обобщенных координат для рассматриваемой модели соответствует рассмотренному выше (см. рис. 2.11) и равно пяти. (5x5)- матрица жесткости  $C$ , приведенная к исследуемому образцу в системе координат  $\xi \eta \zeta$ , имеет следующие отличные от нуля элементы

$$\begin{aligned}
 C_{1,1} &= \frac{3EJ_n}{l^3} ; C_{2,2} = \frac{3EJ_\xi}{l^3} ; C_{3,3} = \frac{EJ_\xi}{l} ; \\
 C_{4,4} &= \frac{EJ_n}{l} ; C_{4,1} = C_{1,4} = \frac{2EJ_n}{l^2} ; \\
 C_{2,3} &= C_{3,2} = \frac{2EJ_\xi}{l^2} ; C_{5,5} = GJ_k ,
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

стр. 117

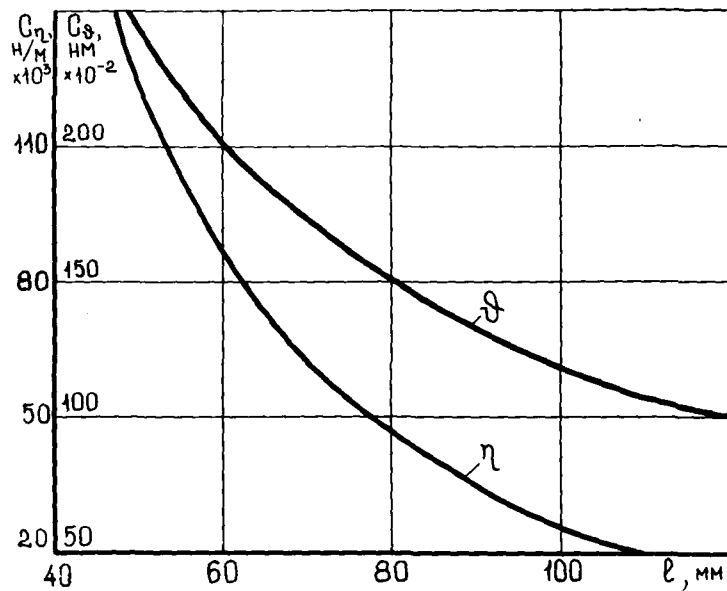


Рис. 3.22. Тарировочные графики изгибной и крутильной жесткостей упругого элемента стенда.

стр. 117

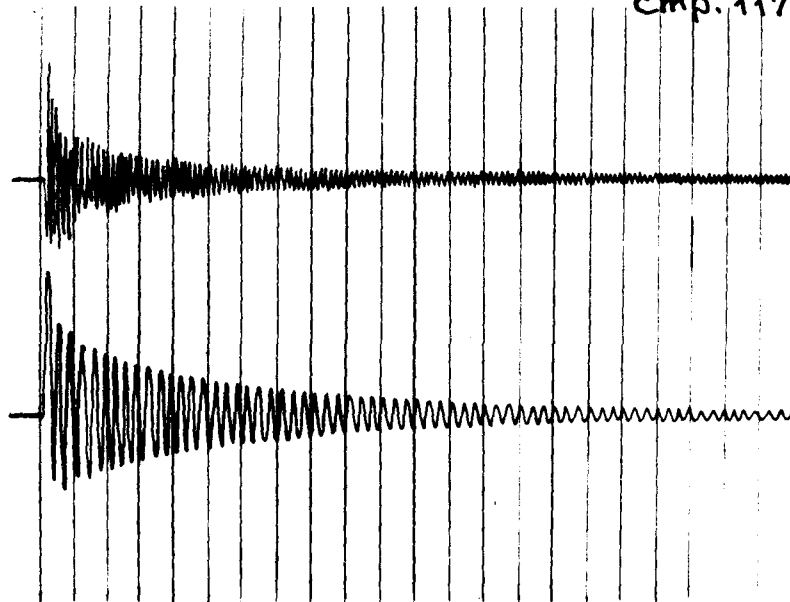


Рис. 3.23. Осциллограммы собственных колебаний при вылете упругого элемента 100 мм.

где  $l_{\geq}$  - величина вылета упругого элемента.

Матрица инерции  $A$ , также приведенная к образцу, есть (5x5)-диагональная матрица со следующими отличными от нуля элементами

$$\begin{aligned} a_{1,1} &= a_{2,2} = \rho(0,243 a_{\geq} b_{\geq} l_{\geq} + a_1 b_1 l_1); \\ a_{3,3} &= \frac{a_{1,1}}{12} \left[ l_1^2 + a_1^2 + 12 \left( a_1 + \frac{a_{\geq}}{2} \right) \right]; \\ a_{4,4} &= \frac{a_{1,1}}{12} [a_1^2 + b_1^2]; \quad a_{5,5} = a_{4,4} + a_{1,1} \left( a_1 + \frac{a_{\geq}}{2} \right), \end{aligned} \quad (3.3)$$

где  $\rho$  - плотность материала исследуемой заготовки;  $b_{\geq}$  - ширина упругого элемента;  $a_{\geq}$  - высота упругого элемента;  $a_1$  - высота образца;  $b_1$  - длина образца;  $l_1$  - ширина образца.

Размеры  $a_{\geq}$  и  $b_{\geq}$  поперечного сечения упругого элемента выбираются таким образом, чтобы моменты инерции  $J_{\xi}$ ,  $J_{\eta}$ ,  $J_{\kappa}$  в (3.2) соответствовали лопаточным. В первом приближении их можно выбрать в соответствии с зависимостями

$$a_{\geq} = \sqrt[8]{\frac{144 J_{\xi}^3}{J_{\eta}}}; \quad b_{\geq} = \sqrt[8]{\frac{144 J_{\kappa}^3}{12 \rho^3 J_{\eta}}}, \quad (3.4)$$

где  $\rho$  - коэффициент, зависящий от отношения  $b_{\geq}/a_{\geq}$ .

Моменты инерции  $J_{\xi}$ ,  $J_{\eta}$ ,  $J_{\kappa}$  в (3.2) должны быть уточнены с учетом (3.4). Вылет упругого элемента  $l_{\geq}$  определяется для нормальной координаты в (2.69), соответствующей минимальному значению изгибной жесткости, которая численно равна

$$l_{\geq} = \sqrt[3]{\frac{3 E J_{\eta}}{C_{1,1}}}. \quad (3.5)$$

Выбор размеров образца, устанавливаемого на упругом элементе, имеет также существенное значение и осуществляется в зависимости от особенностей обрабатываемой заготовки. Они выбираются для нормальных координат в (2.69), соответствующих первым формам изгибных и крутильных колебаний, численно равных элементам матрицы  $A$  в (3.3). Для их определения можно вычислить площадь сечения образца  $S_1$  в плоскости  $XOY$  при заданном значении  $l_1$  по формуле

$$S_1 = \frac{a_{1,1} - 0,243 \rho a_3 b_3 l_3}{\rho l_1} \quad (3.6)$$

Соотношение между высотой  $a_1$  и шириной  $b_1$  образца определяется зависимостью

$$b_1 = \sqrt{\frac{12 a_{5,5}}{a_{1,1}} - a_1^2 + 12 a_1 - \frac{a_3}{2}} \quad (3.7)$$

Размеры образца  $a_1$  и  $b_1$  выбираются с соотношении, определяемом (3.7), их конкретные значения определяются последовательными приближениями до тех пор, пока их произведение не будет в достаточной степени приближено к  $S_1$  в (3.6).

Собственные частоты и формы колебаний для рассматриваемого стержня можно вычислить по (2.66) с использованием стандартного программного обеспечения. Однако, при проектировании стержня, а также при подборе размеров образцов целесообразно пользоваться зависимостями, приближенно определяющими собственные частоты стержня. Элементы  $(5 \times 1)$ -матрицы-столбца собственных частот  $\Omega$  в направлении пяти выбранных обобщенных координат могут быть также получены из выражений

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EJ_n}{a_{1,1} l_3^3} \left( 1 - \frac{3(0,789 a_1 + 0,5 a_3)^2}{l_3^2} \right)};$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EJ_k}{a_{1,1} l_3^3} \left( 1 - \frac{0,063 (a_1 + a_3)^2}{l_3^2} \right)};$$

$$f_3 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EJ_k}{a_{1,1} l_3^3} \left( 3 + \frac{4 l_3^2}{4 (0,789 a_1 + 0,5 a_3)^2} \right)}; \quad (3.8)$$

$$f_4 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EJ_n}{a_{1,1} l_3^3} \left( 3 + \frac{4 l_3^2}{0,084 (a_1 + a_3)^2} \right)};$$

$$f_5 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{G J_k}{a_{5,5} l_3}}$$

Используя перечисленные зависимости, можно подобрать параметры стенда, соответствующие практически любой турбинной лопатке. Параметры изготовленного стенда соответствуют лопаткам последних ступеней паровых турбин, в частности 5 ступени турбины К-750.

### 3.4.2. Результаты экспериментального исследования двухчастотной динамической модели

Для экспериментального исследования расчетной двухчастотной модели лопатки (2.89) при контурном фрезеровании были выбраны следующие параметры стенда:  $a_3 = 10$  мм;  $b_3 = 50$  мм;  $l_3 = 50 + 110$  мм;  $a_1 = 40$  и  $30$  мм;  $b_1 = 90$  и  $135$  мм;  $l_1 = 90$  и  $70$  мм; материал упругого элемента и образца - 20Х13. Параметры режущего инструмента - концевой фрезы: радиус - 22 мм; угол наклона зубьев -  $30^\circ$ ; число зубьев - 6; вылет - 100 мм;



материал режущей части - Р6М5. Номинальные значения параметров обработки: глубина резания - 2 мм; рабочая подача - 0,1 мм/зуб; скорость резания - 25 м/мин; угол положения фрезы -  $25^{\circ}$ ; координаты X, Y формообразующей точки (0.; 38.).

Варьируемые в ходе эксперимента параметры: скорость резания - 10 + 80 м/мин; рабочая подача - 0,05 + 0,35 мм/зуб; глубина резания - 0,5 + 5 мм; угол положения фрезы - 5 + 45 град.; координата X формообразующей точки - -130 + +130 мм; вылет упругого элемента - 50 + 110 мм. В ходе эксперимента были рассмотрены следующие совместно варьируемые параметры:

1. Скорость резания - глубина резания;
2. Скорость резания - рабочая подача;
3. Скорость резания - угол положения фрезы;
4. Глубина резания - угол положения фрезы;
5. Глубина резания - рабочая подача;
6. Угол положения фрезы - рабочая подача.

Для шести пар совместно варьируемых параметров были проведены расчетные и экспериментальные исследования на разработанном динамическом стенде. При этом фиксированно менялись следующие параметры: вылет упругого элемента от 50 до 110 мм с шагом 10 мм; координата X формообразующей точки от -70 до +70 мм с шагом 20 мм.

Рассмотрим реализацию одного из приведенных режимов (вылет упругого элемента 80 и 100 мм, угол положения фрезы -  $25^{\circ}$ ). Расчетные границы устойчивости приведены на рис. 3.24. Более подробно рассмотрим положения 1 и 2 при вылете упругого элемента 100 мм. Они соответствуют двум соседним значениям частоты вращения фрезы - 200 и 250 об/мин. Первый режим соот-

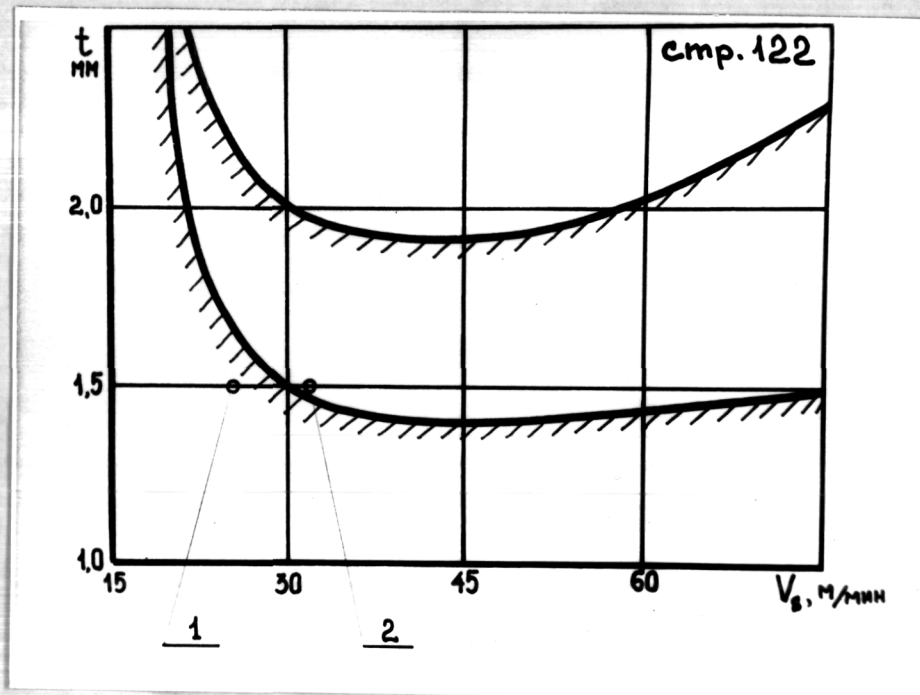


Рис. 3.24. Границы устойчивости в плоскости параметров скорость - глубина резания при следующих параметрах станка: угол положения фрезы  $25^\circ$ , вылет упругого элемента 80 и 100 мм.

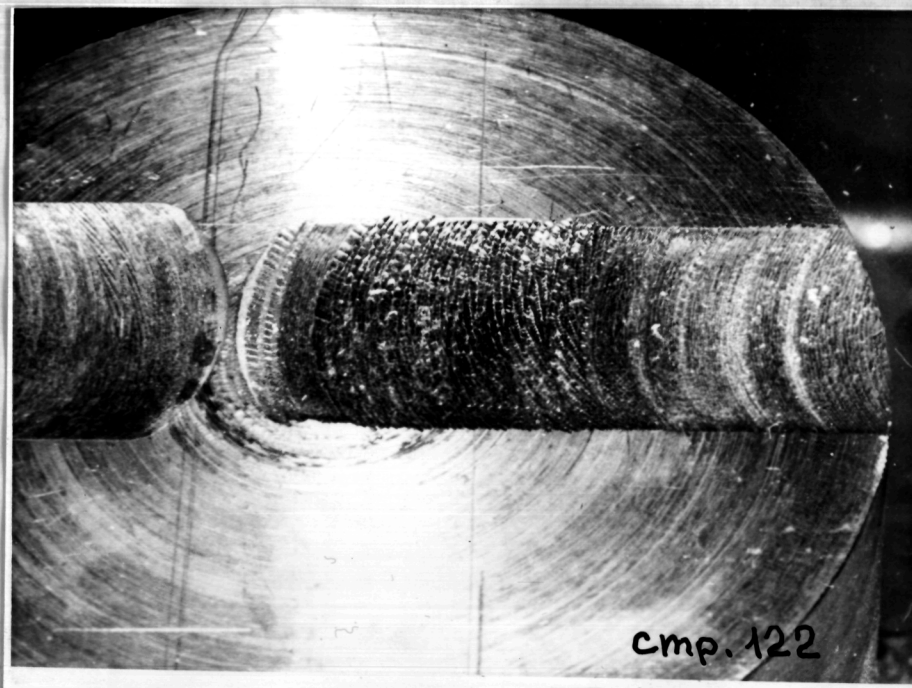


Рис. 3.25. Поверхность образца после обработки.

ветствует резанию в области устойчивости, о чем свидетельствует осциллограмма, приведенная на рис. 3.26. При переходе ко второму режиму происходит резкая потеря устойчивости. На осциллограмме (рис. 3.27) видно, что амплитуды колебаний увеличились в 3-4 раза. Границу между устойчивыми и неустойчивыми режимами можно наблюдать и по рельефу обработанной поверхности (рис. 3.25). Дальнейшее увеличение скорости резания незначительно увеличивает уровень амплитуд (рис. 3.28-3.29), что можно отнести к дополнительному увеличению амплитуд за счет резания по следу. Расчетные и экспериментальные границы области устойчивости проходят достаточно близко, причем максимальные отклонения между ними не превышают 23 %. Отсутствие бесступенчатого регулирования скорости резания на станке не давало возможности определить экспериментальную границу устойчивости более точно. Результаты обчета основных режимов станда приведены в Приложении .

Была исследована большая гамма лопаток на операции фрезерования профильной части концевыми фрезами. Это лопатки 27, 29, 31 ступеней турбины К-300 и лопатки 5 ступени турбины К-750. На рис. 3.30 - 3.33 приведены примеры построения границ устойчивости для рабочих лопаток 5 ступени турбины К-750 на операции кругового фрезерования профильной части в трех сечениях ( $Z = 272$  мм,  $Z = 454$  мм,  $Z = 714$  мм) со стороны выходной кромки. Они свидетельствуют о том, что адаптация механической обработки по динамическим параметрам имеет существенное значение.

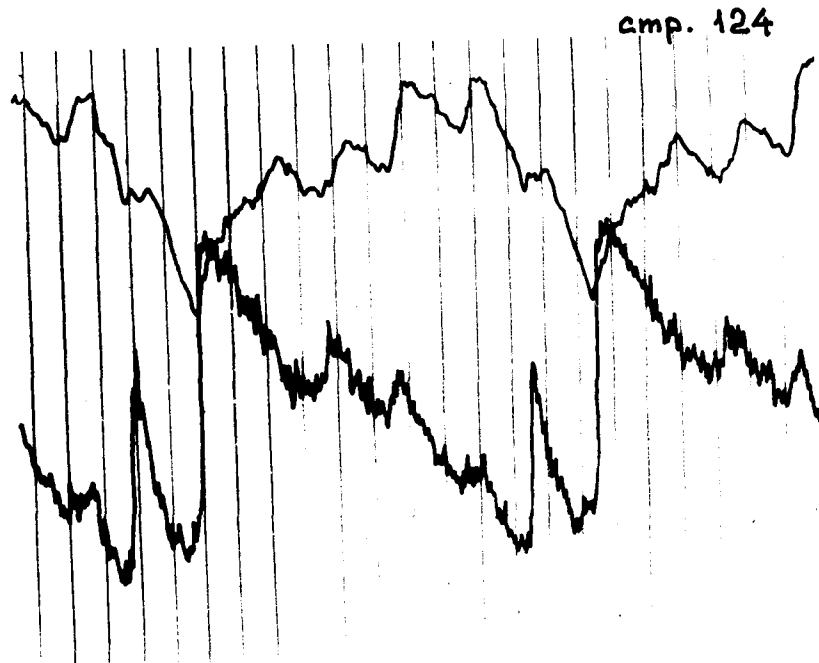


Рис. 3.26. Осциллограмма смещений в изгибном и крутильном контурах при частоте вращения фрезы 200 об/мин.

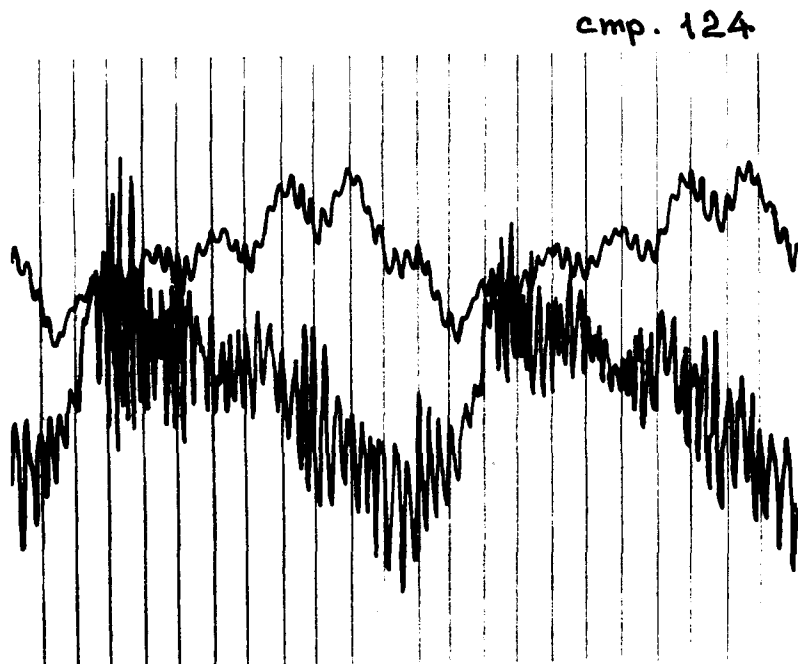


Рис. 3.27. Осциллограммы смещений в изгибном и крутильном контурах при частоте вращения фрезы 250 об/мин.

стр. 125

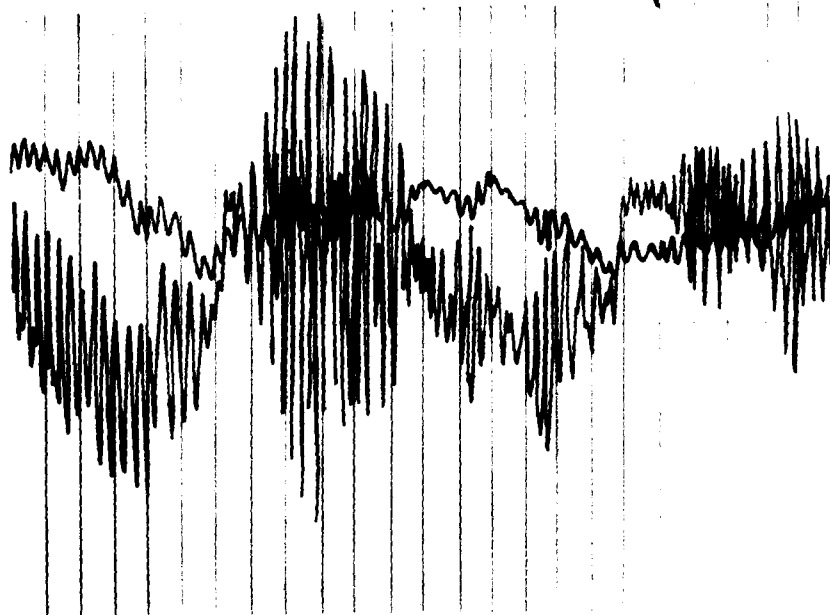


Рис. 3.28. Осциллограммы смещений в изгибном и крутильном контурах при частоте вращения фрезы 315 об/мин.

стр. 125

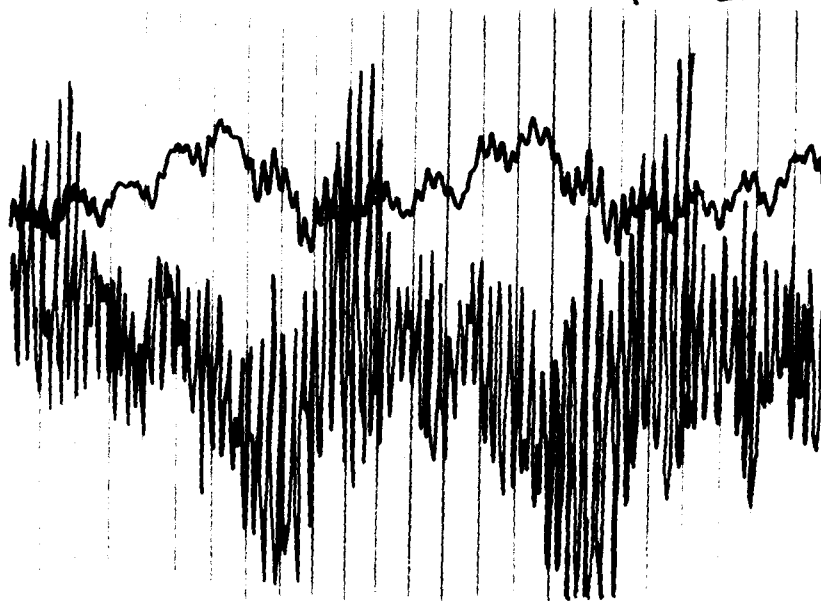


Рис. 3.29. Осциллограммы смещений в изгибном и крутильном контурах при частоте вращения фрезы 400 об/мин.

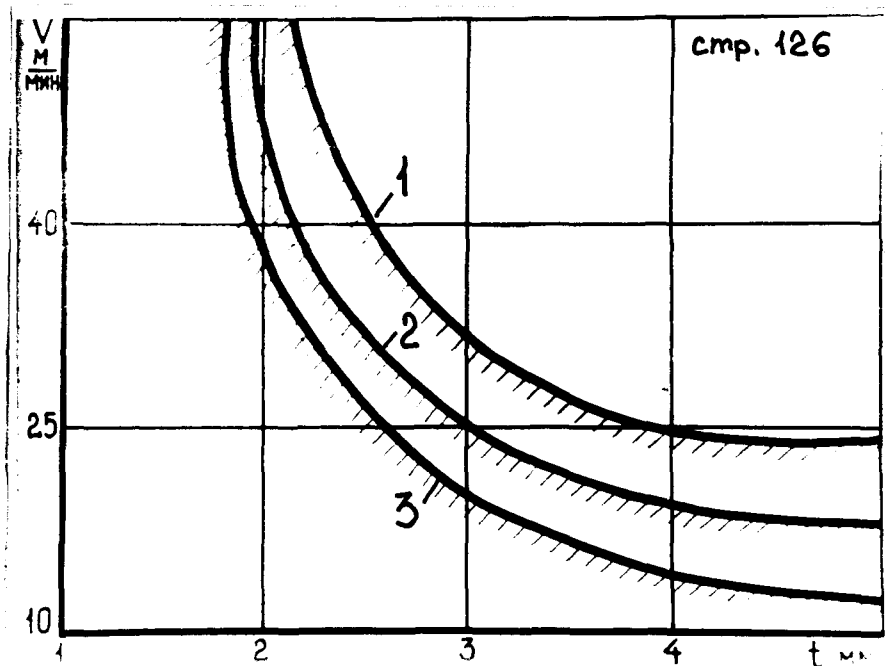


Рис. 3.30. Граница устойчивости при фрезеровании профильной части лопатки 5 ступени турбины К-750 в плоскости параметров глубина - скорость резания.

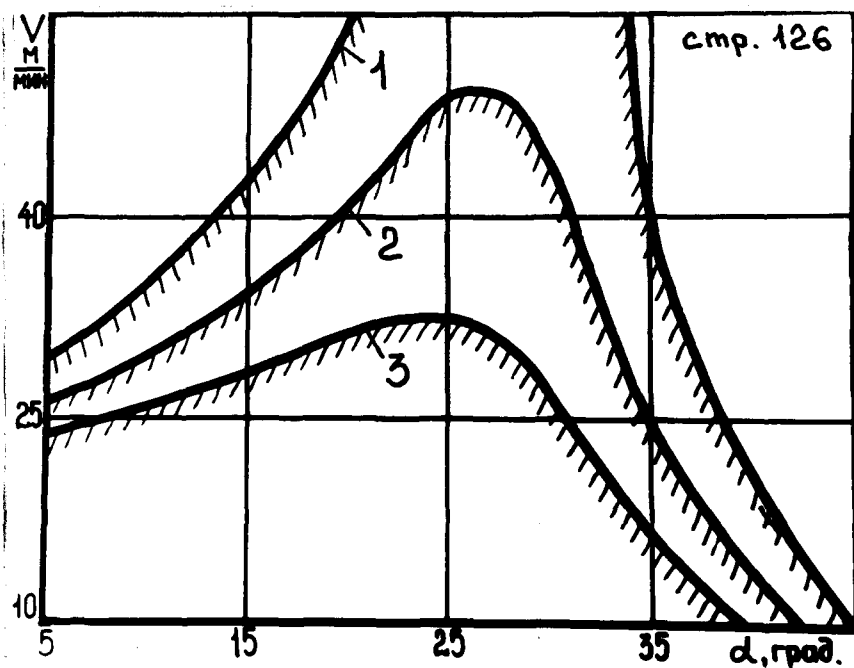


Рис. 3.31. Граница устойчивости при фрезеровании профильной части лопатки 5 ступени турбины К-750 в плоскости параметров угол положения фрезы - скорость резания.

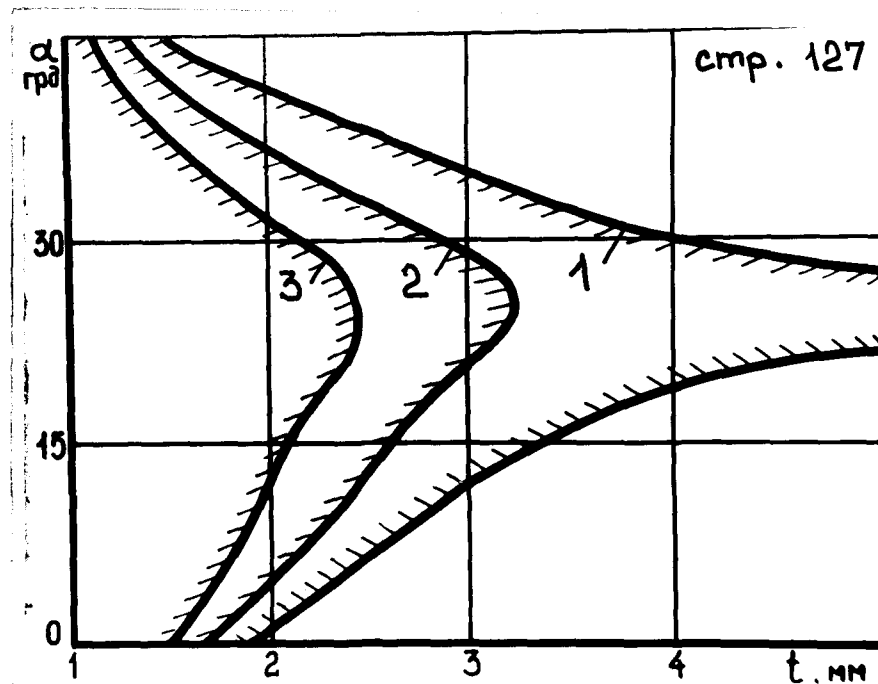


Рис. 3.32. Граница устойчивости при фрезеровании профильной части лопатки 5 ступени турбины К-750 в плоскости параметров глубина резания - угол положения фрезы.

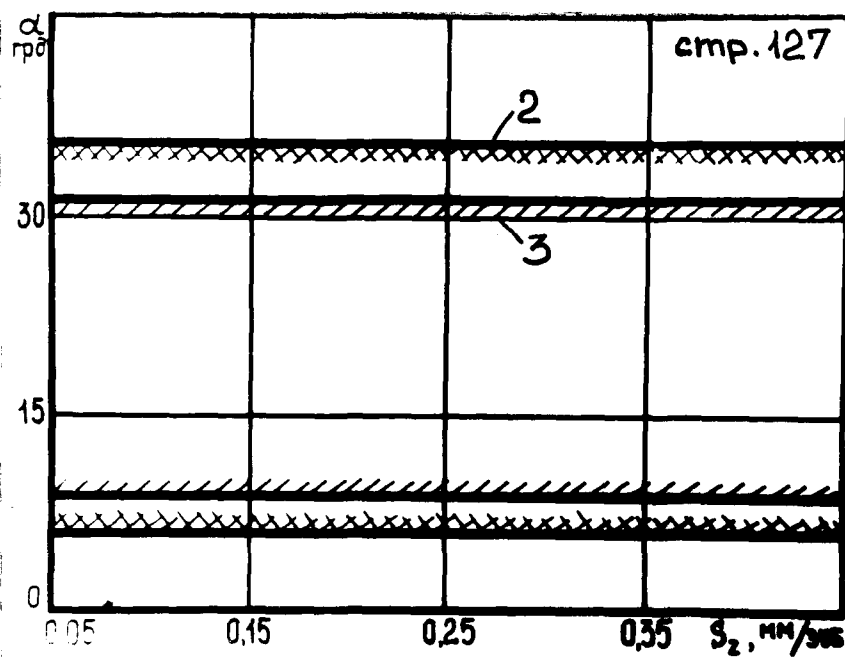


Рис. 3.33. Граница устойчивости при фрезеровании профильной части лопатки 5 ступени турбины К-750 в плоскости параметров рабочая подача - угол положения фрезы.

### 3.5. В Н В О Д Ы

1. Тестирование разработанных программных алгоритмов показало, что действие деформирующей способности сосредоточенных сил и поверхностных технологических остаточных напряжений на деформативность маложесткой заготовки учтено достаточно корректно. Сравнение с аналитическими и экспериментальными исследованиями других авторами показало, что отклонения между ними не превысили 14 %.

2. Проведенные экспериментальные исследования жесткости частично обработанных турбинных лопаток показали, что отклонения теоретических значений от экспериментальных не превысили 18 %; это подтверждает правильность предложенного расчетного метода.

3. Разработанная экспериментальная установка для измерения жесткости концевых фрез позволила смоделировать действие силы резания на зуб фрезы и осуществить отдельное фиксирование составляющих деформаций фрезы; результаты исследования позволили убедиться в правильности полученных расчетных зависимостей.

4. Спроектированный и изготовленный двухчастотный динамический стенд дал возможность осуществить экспериментальное исследование динамической модели турбинной лопатки в процессе резания; предложенные расчетные зависимости позволили подобрать параметры стенда, обеспечивающие динамическое подобие с исследуемыми турбинными лопатками.

5. Проведенный комплекс экспериментальных исследований статических и динамических параметров технологической системы показал правильность исходных предположений и работоспособность предложенного программного обеспечения.



#### 4. ПРОГРАММНАЯ АДАПТАЦИЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ МАЛОЖЕСТКИХ ЗАГОТОВОК ПО СТАТИЧЕСКИМ И ДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

##### 4.1. Постановка задачи программной адаптации

При фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок возникает проблема выбора условий обработки, обеспечивающих максимальную производительность при соблюдении заданной точности. Это особенно важно при использовании станков с ЧПУ в условиях безлюдной технологии. Задача адаптации обработки должна решаться комплексно, начиная с подготовки производства и заканчивая непосредственно обработкой. Необходимо разумное сочетание программной и аппаратной адаптации. Если все отклонения от нормальных условий систематического и квазисистематического характера учесть на этапе подготовки управляющей программы обработки, то это в значительной степени сэкономит время и средства на аппаратную адаптацию непосредственно при обработке. Аппаратные средства достаточно широко применяются в условиях ГПС. Устройства адаптивного управления позволяют адаптировать рабочую подачу в зависимости от случайного изменения силы резания [110], связанного с неоднородностью обрабатываемого материала, локальным изменением припуска, наличием корки на поверхности обрабатываемых заготовок. Существуют устройства, которые также позволяют адаптировать и скорость резания [6]. Появление отклонений систематического и квазисистематического характера может привести к тому, что аппаратная адаптация не в состоянии будет решить задачи обеспечения точности обработки. Здесь необходимо отвести важное место этапу подготовки управляющей программы обработки, в част-

ности выбору режимов резания, т.е. задаче программной адаптации. Ее место в общей постановке задачи видно из рис. 4.1. Для идеализированной заготовки формируется управляющая программа обработки. Режимы резания - рабочая подача и скорость резания - изначально выбираются следующим образом [38]. В двухпараметрической плоскости с абсциссой  $S_z$  (рабочая подача) и ординатой  $V_s$  (скорость резания) можно найти геометрическое место точек касания кривых постоянного относительного износа  $h$  и постоянной производительности обработки ( $R$ ). Кривая, проходящая через эти точки (жирная кривая на рис. 4.2), есть характеристическая функция вида

$$\frac{\partial R}{\partial S_z} / \frac{\partial R}{\partial V_s} = \frac{\partial h}{\partial S_z} / \frac{\partial h}{\partial V_s} \quad (4.1)$$

Параметры производительность обработки и относительный линейный износ, входящие в уравнение (4.1), для случая фрезерования профильной части турбинной лопатки концевой фрезой могут быть описаны зависимостями [38]

$$R = \frac{500 V_s S_z Z}{\pi r} ; \quad (4.2)$$

$$h = b_0 + b_1 V_s + b_2 S_z + b_{12} S_z V_s + b_{11} V_s^2 + b_{22} S_z^2 ,$$

где  $Z$  - число зубьев фрезы;  $b_0 \dots b_{22}$  - экспериментальные коэффициенты уравнения износа;  $r$  - радиус фрезы.

Выбор оптимальных режимов резания можно осуществить путем решения дифференциального уравнения следующего вида

$$\frac{\partial y}{\partial R} dR + \frac{\partial y}{\partial h} dh = 0 , \quad (4.3)$$

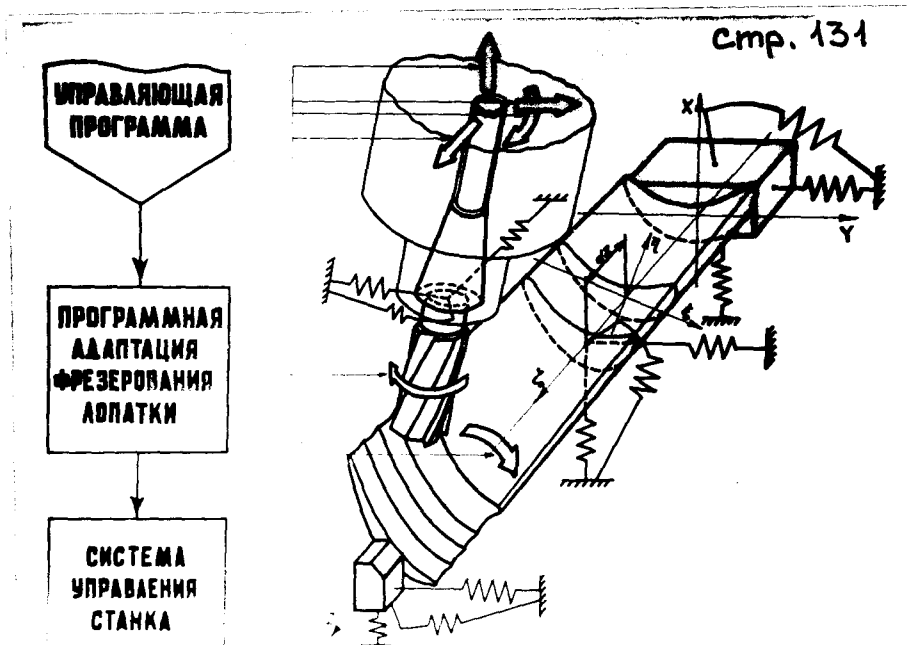


Рис. 4.1. Общая постановка задачи программной адаптации.

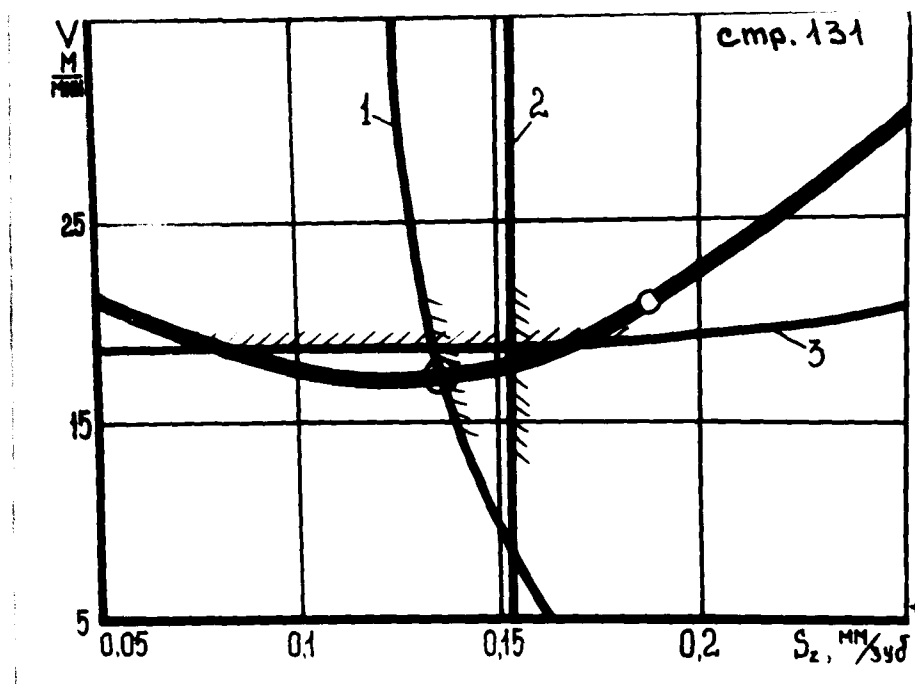


Рис. 4.2. Область допустимых режимов резания в результате адаптации обработки по статическим и динамическим параметрам.

где  $\mathcal{U}$  - целевая функция оптимизации.

Решая уравнение (4.3), можно найти сочетание параметров обработки, которые всегда будут располагаться на характеристической кривой (4.1). Экономически оптимальные сочетания параметров обработки не всегда будут осуществимы на практике. Для обеспечения точности обработки в условиях ГПС на эти режимы должны быть наложены ограничения. Как уже было установлено выше, наиболее существенными являются ограничения по статическим и динамическим параметрам. При этом необходимо также учитывать ограничения по прочности звеньев технологической системы. К ним можно отнести ограничения по прочности тела фрезы, по прочности зуба фрезы, наибольшим усилиям подачи, по размещению стружки в стружечной канавке. По литературным данным [103] поломка концевых фрез в районе стружечной канавки составляет 53 % для фрез с нормальным вылетом (до двух диаметров) и 91 % - для удлиненных фрез, а разрушение зубьев концевой фрезы достигает 38 %.

При обработке фреза испытывает сложное напряженное состояние. Быстрорежущие стали, из которых, как правило, изготавливают концевые фрезы, являются хрупкими. Все это дает основание применить к оценке прочности критерий прочности Писаренко-Лебедева [95]. При этом выражение для эквивалентного напряжения можно записать в следующем виде

$$\sigma_{экв} = \frac{1-\varphi}{2} \sigma_{изг} + \frac{1+\varphi}{2} \sqrt{\sigma_{изг}^2 + 4\tau_{кр}^2} < [\sigma], \quad (4.4)$$

где  $\sigma_{изг}$  - максимальное напряжение на изгиб материала зуба фрезы;  $\tau_{кр}$  - предельное напряжение на кручение;  $\varphi = \frac{\sigma_+}{\sigma_-}$  -

отношение допускаемых напряжений при растяжении и сжатии. Разработанный алгоритм расчета жесткости концевых фрез позволяет построить тензор напряжений в опасном сечении фрезы для оценки условий прочности в соответствии с (4.4).

Применение программной адаптации фрезерования маложестких заготовок позволяет существенно повысить производительность обработки при обеспечении заданной точности. В качестве примера рассмотрим возможности программной адаптации при круговом фрезеровании лопатки 5 ступени турбины К-750. Для положения фрезы со стороны наружного профиля у выходной кромки с координатой  $Z$  формообразующей точки 714 мм был осуществлен расчет режимов обработки. На рис. 4.2 представлен график, иллюстрирующий выбор рабочей подачи. На графике жирной линией представлена характеристическая кривая, на которой отмечена оптимальная с точки зрения износа рабочая подача - 18 мм/зуб. Однако, эту кривую ограничивают кривые 1, 2, 3, которые соответствуют: 1 - ограничение по остаточной деформации - 0,13 мм/зуб; 2 - ограничение по деформативности в технологической системе - 0,15 мм/зуб; 3 - ограничение по устойчивости невозможного движения - 0,16 мм/зуб. из графика видно, что ограничение по остаточным деформациям является преобладающим в данном положении. Был осуществлен также выбор рационального угла положения фрезы по отношению к заготовке. Расчет показал, что наиболее рациональным является угол положения  $\alpha = 27^\circ$  (рис. 4.3), при этом угле деформации в технологической системе минимальны. Расчет границы устойчивости в плоскости параметров угол положения - скорость резания (рис. 3.32) показал, что при данном угле положения система имеет максимальный запас устойчивости и  $V_g = 29$  м/мин.

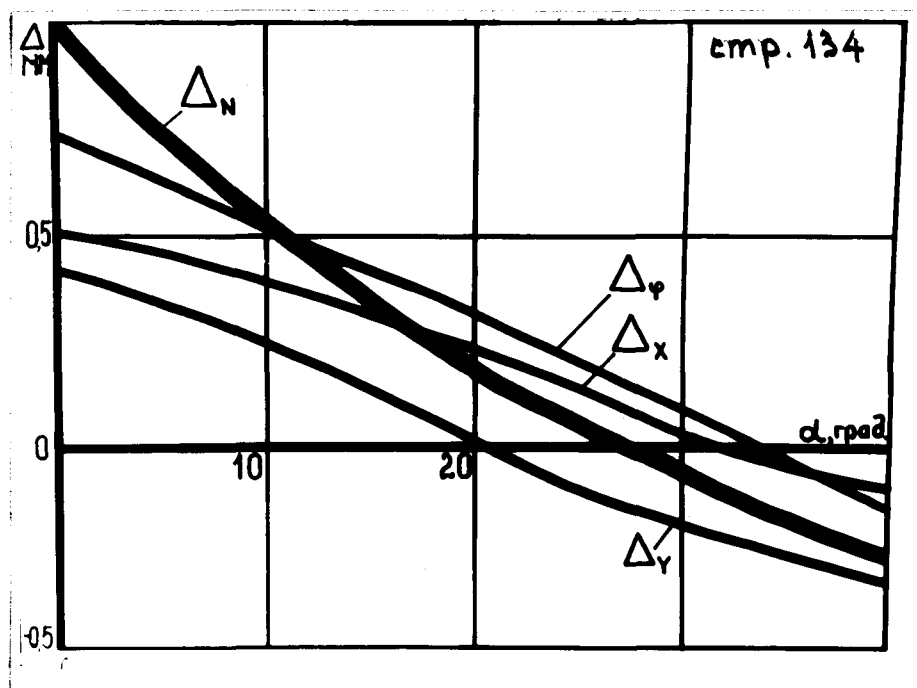


Рис. 4.3. Выбор рационального положения фрезы по отношению к профильной части лопатки при круговом фрезеровании.

#### 4.2. Алгоритм программной адаптации при фрезеровании маложестких заготовок

Алгоритм программной адаптации реализован в виде автономной диалоговой подсистемы, которая позволяет формировать условия взаимодействия режущего инструмента и заготовки таким образом, чтобы добиться максимальной производительности с соблюдением требуемой точности. Он приведен на рис. 4.4. Алгоритм можно разделить на семь укрупненных блоков, взаимодействующих друг с другом:

1. Организация исходных данных;
2. Формирование упругих характеристик заготовки и фрезы;
3. Формирование вектора силовых параметров;
4. Формирование вектора деформации в расчетных точках;
5. Адаптация вектора деформации по точностным характеристикам;
6. Построение динамической модели при резании;
7. Адаптация режимов и условий резания с учетом динамических параметров обработки.

Осуществим более подробное описание алгоритма с указанием необходимых расчетных зависимостей:

1. Организация исходных данных. Они включают в себя данные о заготовке, фрезе и станке, которые хранятся в базе данных. Для подробного описания заготовок (турбинных лопаток) в организованной форме хранится и в случае необходимости пополняется (см. описание программы LOPDAN в приложении 1) геометрическая информация о хвостовой и головной частях, а также о рабочем профиле, который может быть задан радиусографическим или точечным способом. Кроме того, данные о механических характеристиках обрабатываемого материала. Данные о фрезе вклю-

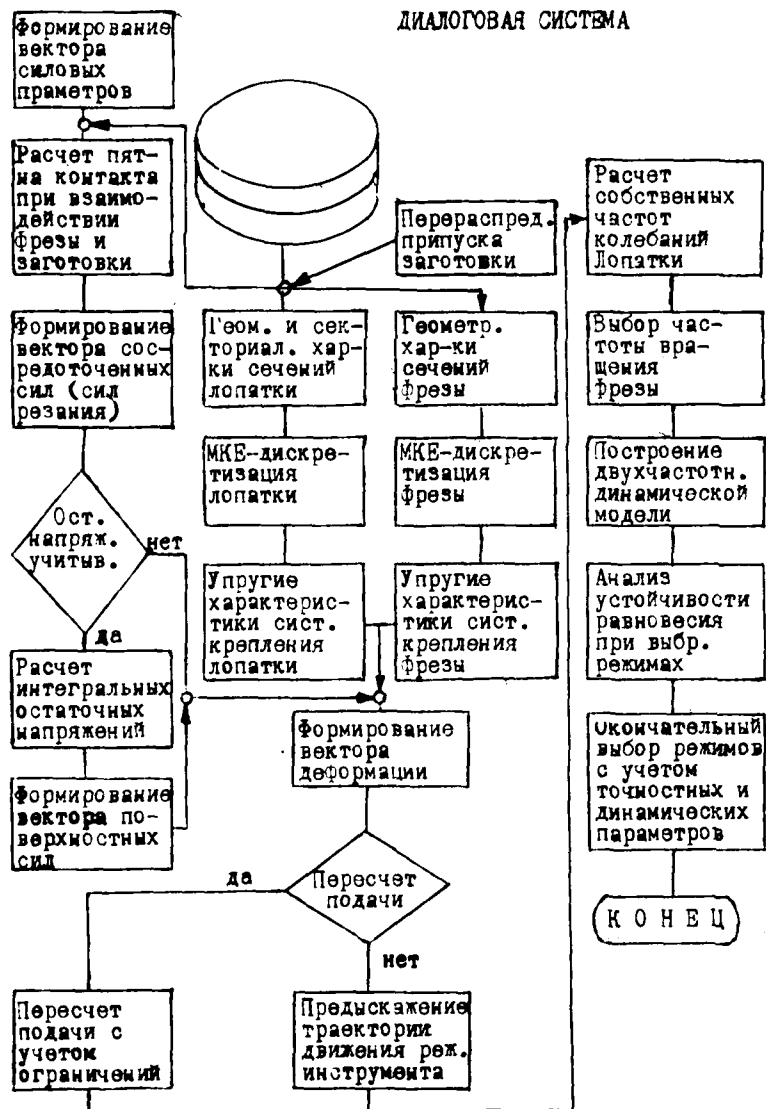


Рис. 4.4. Алгоритм программной адаптации фрезерования маложестких заготовок.



чают геометрическую информацию (рис. 2.5), а также механические характеристики рабочей и нерабочей частей фрезы. Данные о станке включают информацию о максимальных ходах управляемых координат, предельные значения частот вращения шпинделя и рабочих подач, а также информацию об оснастке – собственные жесткости элементов системы крепления заготовки и фрезерной оправки.

2. Формирование упругих характеристик заготовки и фрезы.

2.1. Перераспределение припуска заготовки  $\delta(z)$ , меняющегося вдоль продольной оси в соответствии с (2.52).

2.2. Преобразование геометрии профильной части заготовки с учетом п. 2.1 и расчет геометрических и секториальных характеристик поперечных сечений (программа ARTOL1 в Приложении 1 ).

2.3. Преобразование геометрической информации о фрезе в соответствии с (2.20) и расчет геометрических характеристик по (2.21)–(2.24) (программа FRESMУ в Приложении 1 ).

2.4. Дискретизация заготовки и фрезы для построения расчетных моделей в рамках технической теории закрученных стержней в конечноэлементной постановке (программа МКЕв Приложении 1 ).

2.5. Построение матриц жесткости конечных элементов обработанной и необработанной заготовки в соответствии с (2.13).

2.6. Формирование глобальной матрицы жесткости заготовки с учетом частично обработанной профильной части в соответствии с (2.15).

2.7. Построение матриц жесткости конечных элементов фрезы в соответствии с (2.13) с учетом (2.16)–(2.19). Формирование глобальной матрицы жесткости фрезы.

2.8. Модификация глобальных матриц жесткости заготовки и фре-

зы с учетом граничных условий, накладываемых системой крепления в соответствии с зависимостями: для лопатки (2.29)-(2.31), для фрезы (2.30).

3. Вычисление вектора силовых параметров.

3.1. Формирование кинематических условий взаимодействия режущего инструмента и заготовки с расчетом пятна контакта по (2.38) и опрежелением мгновенных значений  $a_i$  и  $b_i$ .

3.2. Выбор неадаптированных режимов резания. Расчет рабочей подачи  $S_z$  и скорости резания  $V_s$  с учетом выражений (4.1)-(4.4), обеспечивающих минимальный износ режущего инструмента.

3.3. Расчет сил резания в соответствии с (2.34), (2.35).

3.4. Формирование вектора силовых параметров  $R_o$  в системе координат фрезы по (2.39).

3.5. Приведение вектора  $R_o$ , приложенного к формообразующей точке на заготовке, к продольной оси заготовки в соответствии с (2.40). Формирование вектора сосредоточенных сил, приведенных к узлам модели, в соответствии с (2.43).

3.6. Расчет интегральных остаточных напряжений  $q_b$  и  $q_n$  в соответствии с (2.45).

3.7. Формирование вектора поверхностных сил с учетом п. 3.6, приведенного к узлам модели, в соответствии с (2.49).

3.8. Формирование глобального вектора силовых параметров с учетом (2.53): для заготовки - по п. 3.4; для фрезы - по пп. 3.5 - 3.7.

4. Формирование вектора деформации.

4.1. Расчет вектора деформации фрезы  $\Delta q_n$  в соответствии с (2.53). Здесь глобальная матрица жесткости  $K$  строится по п. 2.7, вектор силовых параметров  $R$  - по пп. 3.4 и 3.8.

- 4.2. Расчет вектора деформации заготовки  $\Delta q_3$  в соответствии с (2.53). Здесь глобальная матрица жесткости  $K$  строится по пп. 2.5 – 2.6, вектор силовых параметров  $R$  – по пп. 3.5–3.8.
- 4.3. Формирование вектора отклонения формообразующей точки  $\Delta$  на заготовке в соответствии с (2.50) и (2.55).
- 4.4. Расчет проекции вектора отклонения формообразующей точки  $\Delta_N$  на нормаль к поверхности заготовки, проходящей через эту точку – величины погрешности обработки.
5. Адаптация вектора деформации по точностным параметрам.
- 5.1. Сравнение вектора  $\Delta_N$  с допустимыми значениями отклонений. Расчет технических ограничений.
- 5.2. При недопустимом значении вектора  $\Delta_N$  в п. 5.1 – пересчет рабочей подачи и скорости резания по п. 3.2. и возврат к п. 3.1.
6. Построение динамической модели системы при резании.
- 6.1. построение матриц инерции конечных элементов обработанной и необработанной заготовки в соответствии с (2.62). Формирование глобальной матрицы инерции заготовки с учетом частично обработанной профильной части в соответствии с (2.64).
- 6.2. Расчет собственных частот и форм колебаний заготовки с учетом снятого припуска в соответствии с (2.66).
- 6.3. Выбор зон частот вращения фрезы, позволяющих отстроиться по вынужденным колебаниям от собственных частот заготовки.
- 6.4. Построение системы уравнений модели с учетом запаздывающих сил при автоколебаниях в соответствии с (2.76).
- 6.5. Переход к упрощенной двухчастотной динамической модели, соответствующей выражению (2.91).
- 6.6. Анализ устойчивости невозмущенного движения путем исслед-

дования корней характеристического уравнения (2.95).

7. Адаптация режимов резания с учетом динамических параметров.

7.1. Построение границ области устойчивости в плоскости попарно взятых следующих технологических параметров: скорость резания, рабочая подача, глубина резания, угол положения фрезы (см. описание программы RASDLN в Приложении 1).

7.2. Выбор рациональных значений скорости резания, угла положения фрезы, рабочей подачи, глубины резания с учетом пунктов 6.3. и 7.1.

7.3. Проверочный расчет. В случае необходимости возврат к п. 3.1. Выход из подсистемы.

Алгоритм программной адаптации построен по блочной оптимизированной схеме с использованием косвенных командных файлов, что позволяет применять для его реализации мини-ЭВМ невысокой производительности.

**4.3. Технико-экономическое обоснование эффективности программной адаптации по статическим и динамическим параметрам при фрезеровании маложестких заготовок**

**4.3.1. Выбор базы для сравнения и условия сопоставимости вариантов**

В рассматриваемом случае в качестве базового принимается вариант фрезерования рабочего профиля лопатки 29 ступени турбины К-300/240 на фрезерном станке с ЧПУ с постоянными режимами резания, без учета статических и динамических параметров обработки. Новым вариантом будет обработка той же лопатки с переменными режимами резания, учитывающими статичес-

кие и динамические параметры обработки.

Сопоставимость вариантов обеспечивается, когда по каждому из вариантов одинаковы состав продукции, ее качество, годовой объем продукции и сроки ее получения при сходных условиях труда и его безопасности [28,81]. Все эти факторы присутствуют при замене базового варианта на новый, поэтому все различия между сопоставляемыми вариантами сводится к различиям затрат, обусловленных ее производством. Для правильного и эффективного расчета экономического эффекта от внедрения нового варианта технологического процесса важно принимать во внимание как можно больше факторов, влияющих на рост производительности труда и приводящих к снижению затрат и улучшению условий труда.

#### 4.3.2. Техничко-экономический расчет фрезерования турбинных лопаток на станках с ЧПУ

Техничко-экономический анализ сопоставляемых вариантов обработки рабочего профиля турбинной лопатки будем производить на основе показателя народохозяйственных приведенных затрат, который наиболее полно отражает текущие затраты и эффективность капитальных вложений. Величина приведенных затрат определяется по формуле

$$C_n = C_{x_i} + \varepsilon K, \quad (\text{руб/дет-опер.})$$

где  $C_x$  - полная себестоимость  $i$ -ой операции, руб/дет-опер;  
 $\varepsilon$  - норма народохозяйственной эффективности дополнительных капиталовложений,  $\frac{\text{руб/год}}{\text{руб}}$ ;  $K$  - капиталовложения, обусловлен-

ных выполнением  $i$ -ой операции,  $\frac{\text{руб}}{\text{дет-опер/год}}$ .

Полная себестоимость  $i$ -ой операции соответственно равна

$$C_{x_i} = C_{\tau_i} + C_{нц_i} + C_{нз_i} \quad , \quad (\text{руб/дет-опер})$$

где  $C_{\tau_i}$  - технологическая себестоимость  $i$ -ой операции, руб/дет-опер;  $C_{нц_i}$  - прочие цеховые накладные расходы, обусловленные выполнением  $i$ -ой операции, руб/дет-опер;  $C_{нз_i}$  - общезаводские накладные расходы, обусловленные выполнением  $i$ -ой операции, руб/дет-опер.

Цеховая себестоимость операции является основной частью заводской себестоимости операции и состоит из затрат, обусловленных ее выполнением. Без учета прочих цеховых затрат и затрат на заготовку она практически превращается в технологическую себестоимость операции, которую можно выразить как сумму затрат цеха, прямо связанных с ее выполнением.

Любой элемент себестоимости или капитальных вложений прямо или косвенно связан с режимом работы оборудования, поэтому при уточненном методе расчета каждую расчетную величину целесообразно привести к одной минуте работы оборудования, чтобы в дальнейшем эти величины связать с элементами штучно-калькуляционного времени, для которых более определенно выражена их зависимость от режимов резания. Условимся обозначать элементы затрат, приходящиеся на одну минуту работы станка значком "штрих". Тогда удельные капитальные вложения, обусловленные выполнением  $i$ -ой операции, будут выглядеть следующим образом

$$K'_i = K'_{осн_i} + K'_{об_i} \quad , \quad \left( \frac{\text{коп}}{\text{ст.-мин/год}} \right)$$

где  $K'_{осн_i}$  - удельные капиталовложения в основные средства станочника и заточника, приходящиеся на одну минуту работы станка,  $\frac{\text{коп}}{\text{ст.-мин/год}}$ ;  $K'_{об_i}$  - удельные капиталовложения в оборотные средства станочника и заточника,  $\frac{\text{коп}}{\text{ст.-мин/год}}$ .

$$K'_{осн_i} = K'_{ст_i} + K'_{зат_i}, \quad \left( \frac{\text{коп}}{\text{ст.-мин/год}} \right)$$

где  $K'_{ст_i}$  - удельные капитальные вложения в основные средства, закрепленные за рабочим местом станочника,  $\frac{\text{коп}}{\text{ст.-мин/год}}$ ;  $K'_{зат_i}$  - удельные капиталовложения в основные средства, закрепленные за рабочим местом заточника,  $\frac{\text{коп}}{\text{ст.-мин/год}}$ .

Удельные капиталовложения в оборотные средства станочника и заточника, приходящиеся на одну минуту работы станка, будут учтены в процентном отношении от величины удельных капиталовложений в основные средства. Удельные капвложения в основные средства, закрепленные за рабочим местом станочника, определяются по формуле

$$K'_{ст_i} = K'_{с_i} + K'_{з_i} + K'_{уq_i} + K'_{прс_i}, \quad \left( \frac{\text{коп}}{\text{ст.-мин/год}} \right)$$

где  $K'_{с_i}$  - удельные капиталовложения в технологическое оборудование для выполнения  $i$ -ой операции, коп/ст-мин;  $K'_{з_i}$  - удельные капвложения в здания, занимаемые оборудованием, коп/ст-мин;  $K'_{уq_i}$  - удельные капвложения в дорогостоящую оснастку, коп/ст-мин;  $K'_{прс_i}$  - удельные капвложения, связанные с использованием станков с ЧПУ, коп/ст-мин.

Удельные капитальные вложения в дорогостоящую оснастку при выполнении  $i$ -ой операции рассчитываются по формуле

$$K'_{иg_i} = K'_{рч_i} + K'_{ипр_i} + K'_{мер_i}, \quad \left( \frac{\text{КОП}}{\text{СТ.-МИН/ГОД}} \right)$$

где  $K'_{рч_i}$  - удельные капитальные вложения в режущий инструмент, приходящийся на одну минуту его стойкости, коп/ст-мин;  $K'_{ипр_i}$  - удельные капиталовложения в приспособления, коп/ст-мин;  $K'_{мер_i}$  - удельные капиталовложения в мерительный инструмент, коп/ст-мин.

Удельные капитальные вложения, связанные с использованием станков с ЧПУ при выполнении  $i$ -ой операции, рассчитываются по формуле

$$K'_{прс_i} = K'_{сап_i} + K'_{эвм_i}, \quad \left( \frac{\text{КОП}}{\text{СТ.-МИН/ГОД}} \right)$$

где  $K'_{сап_i}$  - удельные капвложения в систему автоматизированной подготовки управляющих программ для станка с ЧПУ, коп/ст.-мин;  $K'_{эвм_i}$  - удельные капвложения в ЭВМ, коп/ст.-мин.

Удельные капитальные вложения в основные средства, закрепленные за рабочим местом заточника, определяются

$$K'_{зат_i} = K'_{сз_i} + K'_{зз_i} + K'_{иgз_i}, \quad \left( \frac{\text{КОП}}{\text{СТ.-МИН/ГОД}} \right)$$

где  $K'_{сз_i}$  - удельные капитальные вложения в заточный станок, приходящиеся на одну минуту стойкости режущего инструмента, коп/ст.мин;  $K'_{зз_i}$  - удельные капвложения в здания, занимаемые станком, коп/ст.-мин;  $K'_{иgз_i}$  - удельные капвложения в дорогостоящую оснастку для заточного станка, коп/ст.-мин.

Технологическая себестоимость обработки лопатки, приходящаяся на  $I$  мин. работы станка, определяется по формуле

$$C'_{T_i} = C'_{от_i} + C'_{з_i}, \quad \left( \frac{\text{КОП}}{\text{СТ.-МИН}} \right)$$



где  $C'_{от}$  - технологическая себестоимость одной минуты работы основного технологического оборудования, коп/ст.-мин;  $C'_{зi}$  - удельные затраты, связанные с использованием заточного станка, коп/ст.-мин.

Технологическая себестоимость обработки лопатки, приходящаяся на I мин. работы осного технологического оборудования, рассчитывается по формуле

$$C'_{отi} = C'_{зi} + C'_{q_i} + C'_{p_i} + C'_{pэi} + C'_{эi} + C'_{кi} + C'_{вi} + C'_{прi} + C'_{урi} \quad (\text{коп/ст.-мин})$$

где  $C'_{зi}$  - заработная плата производственных рабочих, приходящаяся на одну минуту работы станка при выполнении  $i$ -ой операции, коп/ст.-мин;  $C'_{q_i}$  - удельные амортизационные отчисления на реновацию оборудования, коп/ст.мин;  $C'_{p_i}$  - удельные затраты на ремонт механической и электротехнической части станка, коп/ст.-мин;  $C'_{pэi}$  - удельные затраты на ремонт и обслуживание электронных устройств СЧПУ, коп/ст.мин;  $C'_{эi}$  - удельные затраты на силовую электроэнергию, коп/ст.-мин;  $C'_{кi}$  - затраты, связанные с использованием помещения для выполнения  $i$ -ой операции, коп/ст.-мин;  $C'_{вi}$  - удельные затраты на вспомогательные материалы, коп/ст.-мин;  $C'_{прi}$  - удельные затраты на приспособления для выполнения  $i$ -ой операции, коп/ст.-мин;  $C'_{урi}$  - удельные затраты на режущий инструмент, приходящиеся на I мин. его стойкости, коп/ст.-мин.

Удельные затраты, связанные с использованием заточного станка, рассчитываются по формуле

$$C'_{зi} = C'_{ззi} + C'_{qзi} + C'_{кзi} \quad , \quad (\text{коп/ст.-мин})$$

где  $C'_{ззi}$  - заработная плата рабочего-заточника, приходящаяся на I мин. стойкости режущего инструмента  $i$ -го типоразмера,

коп/ст.-мин;  $C'_{qзi}$  - удельные амортизационные отчисления на реновацию заточного станка, коп/ст.-мин;  $C'_{кзi}$  - затраты, связанные с использованием помещения для заточного станка, приходящиеся на I мин. стойкости режущего инструмента, коп/ст.-мин.

Заработная плата производственных рабочих с начислениями в фонд соцстраха, приходящаяся на I мин. работы станка может быть определена по формуле

$$C'_{zi} = C'_{зсi} + C'_{знi} + C'_{зтi}, \quad (\text{коп/ст.-мин})$$

где  $C'_{зсi}$  - заработная плата станочников, коп/ст.-мин;  $C'_{знi}$  - заработная плата наладчиков, коп/ст.-мин;  $C'_{зтi}$  - заработная плата транспортных и подсобных рабочих, коп/ст.-мин.

Алгоритм расчета капитальных вложений и технологической себестоимости обработки рабочего профиля турбинной лопатки, приходящихся на I мин. работы станка, запрограммирован; результаты расчета приведены в приложении . Там же приведены исходные данные и результаты расчета по отдельным показателям. Такой уточненный метод поэлементного расчета себестоимости и капитальных вложений был разработан под руководством профессора К.М.Великанова [28,49,81]. Согласно приведенному в приложении расчету  $K'_c = 459,3 \frac{\text{коп}}{\text{ст.-мин/год}}$ ,  $C'_m = 28,1 \frac{\text{коп}}{\text{ст.-мин/год}}$

Технологическая себестоимость обработки, приходящаяся на I мин. работы станка с учетом цеховых и заводских накладных расходов, вычисляется по формуле

$$C'_x = C'_m + C'_{зс} (K_{нц} + K_{нз}), \quad (\text{коп/ст.-мин})$$

где  $K_{нц}$  - коэффициент прочих цеховых накладных расходов;  $K_{нз}$  - коэффициент заводских накладных расходов.

Для расчета экономического эффекта от применения адаптированных режимов резания программу запуска продукции в производство принимаем равной годовой производительности станка по новому варианту. Тогда величины полной себестоимости и капитальных вложений в годовое количество изделий по новому варианту будут равны

$$C_{x_1} = \frac{C_{x_1}' \cdot F_g \cdot 60}{100 \cdot K_B} = 11270 \quad (\text{руб/год}) ;$$

$$K_1 = \frac{K_1' \cdot F_g \cdot 60}{100 \cdot K_B} = 176400 \quad (\text{руб/год}) ,$$

где  $F_g$  - действительный годовой фонд времени работы станка, час;  $K_B$  - коэффициент, учитывающий выполнение норм.

Показателем достигаемого экономического эффекта является показатель экономии на приведенных затратах

$$\Delta C_n = C_n' - C_n''$$

где  $C_n'$  - приведенные затраты по базисному варианту;  
 $C_n''$  - приведенные затраты по новому варианту.

Применение адаптированных переменных режимов резания при фрезеровании профильной части турбинной лопатки концевой фрезой позволило снизить машинное время обработки на 17%. Учитывая, что машинное время в среднем составляет 90% общего времени обработки, повышение производительности по новому варианту составило 15,3%. тогда величина экономии на приведенных затратах с учетом капитальных вложений в научно-исследовательские разработки  $K_{\text{нир}}$ , будет равна

$$\Delta C_n = C_n' - (0,874 C_{x_1} + (0,874 K_1 + K_{\text{нир}}) \epsilon) = 9130 \text{ руб.}$$

#### 4.4. В Ы В О Д Ы

1. Программная адаптация фрезерования маложестких заготовок по статическим и динамическим параметрам является высокоэффективным средством повышения производительности обработки деталей машин на станках с ЧПУ.

2. Разработанный алгоритм программной адаптации позволяет на этапе построения управляющей программы обработки учесть условия взаимодействия режущего инструмента и заготовки и выбрать режимы обработки, обеспечивающие максимальную производительность.

3. Алгоритм программной адаптации построен в диалоговом режиме, что позволяет вести многовариантное оптимальное проектирование обработки.

4. Расчет экономической эффективности фрезерования профильной части турбинных лопаток с применением программной адаптации показал, что по сравнению с обработкой без адаптации имеет место повышение производительности на 15 - 20 %.

5. Апробация программной адаптации в составе систем автоматизированного проектирования была осуществлена на предприятиях энергетического и авиационного машиностроения. Она показала, что средний годовой экономический эффект от программной адаптации составляет 9100 руб на один станок с ЧПУ.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основании выполненных исследований показано, что интенсификация процесса фрезерования маложестких сложнопрофильных заготовок на станках с ЧПУ может быть достигнута более полным использованием их возможностей путем назначения рациональных режимов обработки с учетом динамических свойств технологической системы.

2. Разработана научн обоснованная динамическая модель технологической системы при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок типа турбинных лопаток, которая использована в качестве основы для выполнения комплекса исследований динамической точности обработки и выбора эффективных методов повышения производительности обработки на станках с ЧПУ.

3. Установлено, что основными факторами, определяющими процесс фрезерования маложестких сложнопрофильных заготовок, являются существенная податливость технологической системы, определяемая в основном специфическими свойствами заготовки, перераспределение припуска, обусловленное применяемыми методами получения заготовок, переменность упруго-инерционных характеристик технологической системы.

4. В результате исследования динамической модели технологической системы показано, что основными факторами, определяющими деформативность и динамические характеристики обработки, являются:

- многосвязанность модели, обусловленная специфическим взаимодействием элементов технологической системы в процессе обработки маложесткой заготовки;
- особенности закрепления заготовки на столе станка при за-

данном расположении подвижных и неподвижных люнетов, что позволяет поставить задачу их оптимального расположения;

- принятая последовательность обработки.

5. Установлены зависимости между деформирующей способностью сил резания и поверхностных остаточных напряжений и деформативностью в технологической системе, которые позволили осуществить приведение силовых параметров к дискретной модели, а также связать специфические особенности технологической системы и процесса резания.

6. Разработанный алгоритм анализа устойчивости технологической системы при фрезеровании маложесткой сложнопрофильной заготовки типа турбинной лопатки с построением границ области устойчивости по различным технологическим параметрам позволил наиболее полно выявить резервы повышения производительности обработки на станках с ЧПУ.

7. Предложенная система программной адаптации фрезерования маложестких заготовок обеспечивает достижение максимальной производительности при выполнении жестких ограничений по точности путем многовариантного проектирования обработки.

8. Проведенный комплекс экспериментальных исследований статических и динамических характеристик технологической системы при фрезеровании маложестких сложнопрофильных заготовок показал правильность исходных предположений и работоспособность предложенного программного обеспечения для станков с ЧПУ.

9. Результаты расчета экономической эффективности фрезерования профильной части турбинных лопаток с применением программной адаптации имеет место повышение производительности на 15 - 20 %, а годовой экономический эффект в пересчете на один

станок с ЧПУ равен 9,1 тыс. руб.

10. Эффективность подсистемы программной адаптации по результатам апробации в составе системы автоматизированного проектирования на ПО Турбостроения "Ленинградский Металлический завод" подтверждена актом внедрения на 27 тыс. руб.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материалы 27 съезда КПСС. М., 1986.
2. Интенсификация - 90. Л., 1985.
3. Основные направления развития народного хозяйства в 1985-1990 и на период до 2000 года. М., 1985.
4. Абель М.М. Исследование жесткости станочных приспособлений. М.: МВТУ, Автореферат диссертации, 1963.
5. Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении / Под ред. Г.К.Грановского. М., 1976. с. 240.
6. Атаманов С.А. Адаптивное управление процессом обработки на станке с ЧПУ // Станки и инструмент, 1975, № 5, с. 9-10.
7. Базров Б.М. Расчет точности машин на ЭВМ. М., 1984. с.256.
8. Бауман Н.Я., Кузюшин В.К. и др. Остаточные напряжения в профильных частях турбинных лопаток после фрезерования // Вестник машиностроения, 1976, № 8, с. 69-71.
9. Безъязычный В.Ф. К вопросу определения осевого момента инерции концевых фрез. Ярославль, 1976.
10. Бейлин И.Ш. Вопросы динамики машинного агрегата с сложной САР скорости: Дис. канд. техн. наук. Л., 1973.
11. Березкин В.В., Зальцман Л.И., Кацнельсон А.И., Щеглов Н.Н. Автоматизированная система технологического проектирования для производства турбинных лопаток. М.: НИИЭинформэнерго-маш, 1978. с. 39.
12. Березкин В.В., Писаренко В.С., Михаэль С.Ю., Бенин Л.А. Технология турбиностроения. Л., 1980.
13. Бердников Л.Н., Бочков И.С. Повышение точности при обработке рабочей части лопаток паровых турбин методом кругового



- фрезерования // Энергомашиностроение, 1976, № 4.
14. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. М., 1977. с. 488.
15. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М., 1980. с. 408.
16. Бобров А.Н., Перченко Ю.Г. Автоматизированные фрезерные станки для объемной обработки. Л., 1979. с. 231.
17. Боришанский К.Н. Особенности колебаний рабочих лопаток цилиндров среднего и высокого давления мощных турбин // Теплоэнергетика, 1977, № 7. с. 21-24.
18. Бутенин Н.В. Введение в аналитическую механику. М., 1971. с. 264.
19. Васильев Д.Т. Теоретические основы распределения припуска на заготовках деталей сложной формы: Автореф. дис. докт. техн. наук. М., 1966.
20. Вейц В.Л., Дондошанский В.К., Чиряев В.И. Вынужденные колебания в металлорежущих станках. М.-Л., 1959. с. 288.
21. Вейц В.Л., Кочура А.Е., Федотов А.И. Колебательные системы машинных агрегатов. Л., 1979. с. 256.
22. Вейц В.Л., Коловский В.З., Кочура А.Е. Динамика управляемых машинных агрегатов. М., 1984. с. 352.
23. Нелинейные задачи динамики и прочности машин / Под ред. В.Л.Вейца. Л., 1983. с. 336.
24. Вибрации в технике: Справочник: В 5 т. М., 1978, т. I, с. 352.
25. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М.-Л., 1940. с. 276.
26. Воробьев Ю.С., Шорр Б.Ф. Теория закрученных стержней. Киев, 1983. с. 186.
26. Воробьев Ю.С., Шульженко Н.Г. Исследование колебаний систем элементов турбоагрегатов. Киев, 1978. с. 135.
27. Воробьев Ю.С. Изгиб стержня с учетом деформации при сдвиге и кручении // Динамика и прочность машин, 1965, вып. I.

с. 125-131.

28. Временная методика определения экономической эффективности металлорежущих станков с ЧПУ. М.:ЭНИМС, 1976.
29. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Пер. с англ.: Под ред. Н.В.Баницука. М., 1984. с. 428.
30. Гинсбург С.М. К расчету частот колебаний лопаток компрессора методом теории оболочек // прочность и динамика авиационных двигателей. М., 1969, вып. 5. с. 242-254.
31. Гольдин Я.Г., Дронов В.В., Рубашкин И.Б. Адаптивная система оптимизации режимов фрезерования // Станки и инструмент, 1975, № 1. с. 18-20.
32. Гончаренко И.Е., Кислоцкий В.Н. и др. Реализация метода конечных элементов для непологих оболочек сложной формы // Сопротивление материалов и теория сооружений. Киев, 1974, вып. 24. с. 16-25.
33. Джанелидзе Г.Ю. К теории тонких и тонкостенных стержней // Прикладная математика и механика, 1949, т.8, вып.6. с.597-608.
34. Джанелидзе Г.Ю., Пановко Я.Г. Статика упругих тонкостенных стержней. Л., 1948. с. 208.
35. Джанелидзе Г.Ю. Соотношения Кирхгофа для естественно закрученных стержней и их приложения // Труды ЛПИ, 1946, № 1, с. 23-32.
36. Дондошанский В.К. Расчет колебаний систем на электронно-вычислительных машинах. М.-Л., 1965. с. 367.
37. Дружинский И.А. Сложные поверхности. Л., 1985. с. 263.
38. Егоров С.Н. Оптимизация режимов фрезерования криволинейных поверхностей на станках с ЧПУ: Дис. канд. техн. наук. Л., 1984.

39. Егоров С.Н. Определение оптимальных режимов фрезерования криволинейных поверхностей // Современные достижения в области механической обработки криволинейных поверхностей на станках с ЧПУ: Материалы краткосрочного семинара. Л.: ЛДНТП, 1983.

40. Жарков И.Г. Исследование автоколебаний, возникающих при обработке резанием конструкционных материалов: Дис. докт. техн. наук. Куйбышев, 1974.

41. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л., 1986. с. 179.

42. Зальцман Л.Н., Львовская С.А., Рогинская Б.И. Математическое обеспечение автоматизированного комплекса измерения профиля лопатки//Энергомашиностроение, 1985, № 4. с.21-22.

43. Зальцман Л.Н. Автоматизированная система проектирования технологических процессов для механической обработки турбинных лопаток АСТПП "Лопатка". М.: НИИЭИнформэнергомаш, 1977, вып. 10. с. 10-13.

44. Зальцман Л.Н., Григорьев Ю.В., Григорьев В.Н. Методика аналитического разделения погрешностей при контроле профиля лопаток // Энергомашиностроение, 1973, № 3. с. 18-19.

45. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. М., 1975. с. 541.

46. Зорев Н.Н., Бирке Н.П. Стойкость и производительность торцовых фрез при смещении заготовки относительно фрезы // Труды ЦНИИТМАШ, кн. 82, М., 1975. с. 57-81.

47. Зяпаев А.А. Расчет жесткости концевых фрез // Станки и инструмент, 1980, № 3. с. 18.

48. Иванов С.Ю., Соколова Г.Г., Беляев П.Н. Выбор рациональных режимов фрезерования турбинных лопаток с учетом технологических остаточных напряжений // Разработка и внедрение

- прогрессивных методов обработки деталей машин: Материалы краткосрочного семинара. Л.:ЛДНТП, 1986. с. 71-76.
49. Инструкция по определению экономического эффекта внедрения станков с ЧПУ в механических цехах Главтурбпрома. РТМ 84-73, ВПТИЭнергомаш.
50. Исаев А.И., Овсеенко А.Н. Определение остаточных напряжений и деформаций компрессорных и турбинных лопаток // Энергомашиностроение, 1968, № 8. с. 31-34.
51. Исаев А.И., Овсеенко А.Н. Выбор оптимальной толщины образца при определении остаточных напряжений в поверхностном слое // Вестник машиностроения, 1967, № 8. с. 74-76.
52. Исазанов Г.В., Кислоцкий В.Н., Сахаров А.С. и др. Система математического обеспечения прочностных расчетов пространственных конструкций // Проблемы прочности, 1978, № II. с. 59-61.
53. Канахин Ф.И. Трехкоординатный прибор для измерения профильной части лопастей моделей поворотно-лопастных гидротурбин // Энергомашиностроение, 1976, № 4. с. 26-29.
54. Каширин А.В. Вопросы устойчивости рабочего движения при обработке металлов резанием // Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов. М., 1958. с.15-18
55. Кириленко А.Л., Филиппов Г.В. Расчет деформаций и напряжений концевой режущего инструмента с винтовыми канавками// станки и инструмент, 1978, № I. с. 29-30.
56. Кириленко А.Л. Влияние угла наклона спиральной канавки на прочность и жесткость сверла // Тр. ЛТИ целлюлозно-бумажной промышленности, Л., 1969, вып. 24. с. 84-87.
57. Коваль М.И., Коробко А.В. Повышение производительности многоцелевых станков путем автоматического управления режимами резания // Станки и инструмент, 1987, № 2. с.14-17.

58. Кондаков А.И., Мельников Г.Н. Определение жесткости концевых фрез // Известия Вузов. Машиностроение, 1976, № II. с. 157-161.
59. Коротин Б.С., Урывский Ф.П. Остаточные напряжения и их регулирование за счет режимов и методов механической обработки // Технологические методы повышения точности в машиностроении: НТО Машпром. М., 1966. с. 76-85.
60. Корсаков В.С. Основы технологии машиностроения. М. 1977. с. 416.
61. Корчак С.Н., Гузеев В.И., Батуев В.А. Влияние конфигурации обрабатываемой детали на основные параметры процесса объемного фрезерования // Современные методы механической обработки криволинейных поверхностей на станках с ЧПУ: Материалы краткосрочного семинара. Л.:ЛДНТП. с. 48-50.
62. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Пер. с англ. под общ. ред. И.Г.Арамановича. М., 1968. с. 720.
63. Корнейчук Н.П. Сплайны в теории приближения. М., 1984.с.325.
64. Краснова Н.В. Исследование и применение методов математического моделирования прогрессивной технологии механической обработки пера крупногабаритных лопаток газовых двигателей: Дис. канд. техн. наук: Вазань, 1981.
66. Кудевицкий Я.В. Фасонные фрезы. Л., 1978. с. 176.
67. Кудинов В.А. Динамика станков. М., 1967. с. 360.
68. Кузюшин В.К. Расчетное и экспериментальное исследование точности механической обработки профильных частей рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин: Дис. канд. техн. наук. Свердловск, 1977.
69. Кузюшин В.К., Рудаков С.П. Остаточные напряжения в турбинных лопаток после обработки концевыми радиусными фрезами//

- Вестник машиностроения, 1981, № 3. с. 25-26.
70. Купершток С.Н., Петров В.П. Расчет остаточных деформаций турбинных лопаток // Энергомашиностроение, 1968, № 1. с. 38-40.
71. Лашнев С.И., Юликов М.И. Расчет и конструирование металло-режущих инструментов с применением ЭВМ. М., 1975. с. 392.
72. Левин А.В., Боришанский К.Н., Консон Е.Д. Прочность и вибрации лопаток и дисков паровых турбин. Л., 1981. с. 710.
73. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жесткость машин. М., 1971. с. 264.
74. Левина З.М. Исследование и расчет контактной жесткости: Методические указания. М., 1969. с. 146.
75. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М., 1976. с. 278.
76. Мамаев В.С., Дмитриев С.Н., Усачев Ю.И. Податливость турбинных лопаток в процессе обработки рабочих поверхностей // Энергомашиностроение, 1980, № 6. с. 5-8.
77. Маталин А.А. Технология машиностроения. Л., 1985. с. 512.
78. Маталин А.А., Егоров С.Н. Методика оптимизации режимов фрезерования криволинейных поверхностей // Тез. Всесоюзной конференции "Проблемы обработки деталей машиностроения на станках с ЧПУ". М., 1983. с. 57-59.
79. Маталин А.А., Иванов С.Ю., Мусаэлян А.А. Оптимизация режимов фрезерования турбинных лопаток по технологическим начальным напряжениям // Энергомашиностроение, 1986, № 6. с. 33-35.
80. Меркин Д.Р. Введение в теорию устойчивости движения. М., 1976. с. 320.
81. Методика определения экономической эффективности использования оборудования с ЧПУ. М.: НИИЭинформэнергомаш, 1979.
82. Микитянский В.В., Зильберман А.М., Тутлис В.П. Оптимизация

- динамических параметров оснастки для станков с ЧПУ // Технология и автоматизация машиностроения. Киев, 1983, № 31. с. 68-73.
83. Микитянский В.В. Упругая динамическая система и ее расчет// Технологические методы повышения качества машин: Межвузовский сборник. Фрунзе, 1981. с. 3-17.
84. Михаэль С.Ю., Березкин В.В. Технологическая подготовка производства турбин. Л., 1985. с. 255.
85. Многоцелевые системы ЧПУ механической обработкой / Под общ. ред. В.Г.Колосова. Л., 1984. с. 224.
86. Мурашкин Л.С., Мурашкин С.Л. Прикладная нелинейная механика станков. Л., 1977. с. 192.
87. Мурашкин Л.С., Пузанов Ю.В. К определению параметров возмущающей силы при торцовом фрезеровании // Совершенствование процессов обработки металлов резанием: Межвузовский сборник. 1978, № 3. с. III-120.
88. Нормативы времени и расценки на разработку управляющих программ для станков с ЧПУ. М.:Оргстанкпром, 1974.
89. Овсеенко А.Н., Борисоглебский А.Е. Остаточные деформации крупных турбинных лопаток в процессе обработки и методы их уменьшения // тр. ЦНИИТМАШ, № 133, 1977. с. 34-44.
90. Повышение точности обработки маложестких деталей путем регулирования технологических остаточных деформаций // Поверхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов: Материалы краткосрочного семинара. М.:МДНТП, 1980. с. 107-112.
91. Основы динамики и прочности машин / Под. ред. В.Л.Вейца. Л., 1978.

92. Панов Ф.С., Егоров С.Н. Исследование относительного линейного износа при фрезеровании // Резание и инструмент. Харьков, 1983, вып.30. с. 29-31.
93. Панов Ф.С., Егоров С.Н., Травин А.И. Определение пути резания при круговом фрезеровании криволинейных поверхностей на станках с ЧПУ // Опыт и перспективы эффективного использования технологического оборудования с программным управлением: Материалы краткосрочного семинара. Л.:ЛДНТП.с.52-55.
94. Панов Ф.С., Травин А.И., Балдин Л.М. Подсистема расчета на ЭВМ режимов резания при строчечном фрезеровании турбинных лопаток на станках с ЧПУ // Тез. докл. Всесоюзной конференции. 1982, с. 34-35.
95. Писаренко Г.О., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев, 1975. с. 704.
96. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М., 1977. с. 304.
97. Попов В.Н., Локтев В.Н. Динамика станков. Киев, 1975.с.136.
98. Постнов В.А. численные методы расчета судовых конструкций. Л., 1977. с. 280.
99. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. Л., 1974. с.342.
100. Проников А.С. Программный метод испытания металлорежущих станков. М., 1985. с. 288.
101. Решетов Д.Н., Каменская В.В., Левин А.И., Портман В.Т. Современные направления развития станкостроения // Станки и инструмент, 1977, № 6. с. 4-8.
102. Розин Л.А. Стержневые системы как системы конечных элементов.Л., 1976. с. 232.



103. Свинин В.М. Исследование устойчивости движения и оптимизация технологических параметров при черновом концевом фрезеровании: Дис. канд. техн. наук. Л., 1980.
104. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Под Б.Е.Победри. М., 1979. с. 392.
105. Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов. М., 1963. с. 952.
106. Соломенцев Ю.М., Басин А.М. Оптимизация процесса обработки с помощью адаптивного управления износом режущего инструмента // Станки и инструмент, 1974, № 8. с. 21-22.
107. Сосонкин Б.Л. Микропроцессорные системы числового программного управления станками. М., 1985. с. 288.
108. Станки с числовым программным управлением / Под ред. В.А.Лещенко. М., 1979. с. 592.
109. Сыркин Б.В., Вульман С.А., Хван Д.В. Аналитический расчет жесткости концевых фрез // Производительная обработка материалов резанием: Межвузовский тематический сборник. Воронеж, 1977. с. 38-43.
110. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки на станках с ЧПУ. М., 1982. с. 208.
111. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Пер с англ. под ред. Э.И.Григолюка. М., 1985. с. 472.
112. Тлустый И. Автоколебания в металлорежущих станках / Пер. с чешского В.В.Шварца. М., 1965. с. 395.
113. Травин А.И. Исследование технологических возможностей повышения эффективности использования станков с ЧПУ при фрезеровании криволинейных поверхностей: Дис. канд. техн. наук. Л., 1982.

- II4. Усачев Ю.И. Определение упругих деформаций турбинных лопаток в процессе обработки // Известия Вузов. Машиностроение, 1974, № 5. с. 161-166.
- II5. Филиппов А.П. Колебания деформируемых систем. М., 1970. с. 735.
- II6. Федоров Н.М., Овсеенко А.Н. Влияние остаточных напряжений в заготовках на коробление турбинных лопаток в процессе обработки // Вестник машиностроения, № 7. с. 52-55.
- II7. Чернов Е.А. Конструкция и опыт эксплуатации станков, снабженных автоматами выверки деталей // Опыт и перспективы использования технологического оборудования с программным управлением: Материалы краткосрочного семинара. Л.:ЛДНТП, 1978. с. 23-28.
- II8. Шапошников Н.Н. и др. Расчет машиностроительных конструкций на прочность и жесткость. М., 1981. с. 334.
- II9. Шорр Б.Ф. К теории закрученных тонкостенных стержней // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение, 1960, №5. с. 74-79.
- I20. Эльясберг М.Е. Об устойчивости процесса резания металлов // Изв. АН СССР (ОТН), 1958, № 9. с. 37-52.
- I21. Эльясберг М.Е. О расчете устойчивости процесса резания с учетом предельного цикла системы // Станки и инструмент, 1975, № 2.
- I22. Эльясберг М.Е., Савинов И.А. Экспериментальное определение параметров обрабатываемого материала, влияющих на устойчивость против автоколебаний, и расчет станков // Станки и инструмент, 1979, № 12.
123. Cookson J. Choose and use cutters with care for the Best milling // Metalwork Prod. 1979, 123, № 11, p. 188-189.
124. Effects of end mill deflection on workpiece // Tool. and Prod, 1979, 44, № 11. p. 87.

125. Gygax P.E. Experimental Full Cut Milling Dynamics // CIRP Ann, 1980, 29, № 1, p. 61-66.
126. Gygax P.E. Cutting dynamics and process-structure interactions applied to milling // Wear, 1980, 62, № 6, p 161-184.
127. Gygax P.E. Dynamics of Single-Tooth Milling // CIRP Ann, 1979, 28, № 1, p. 65-70.
128. Haberling E., Hermann H. Besonderheiten, bei der Zerspaltung hoch warmfester Werkstoffe // Schweiz. Maschinenmarkt, 1980, 80, № 8. S 32-35.
129. Meier P., Rehsteiner F, Matthias E. Übertragung berannt. Schnittdaten auf mehrachsige Fräsen // CIRP Ann., 1979, 28, № 1. S 71-76.
130. Nakazawa H., Inada S. Effects of tool edge shapes on dynamics of the metal cutting process // Bull. Jap. Soc. Precis. Eng., 1977, 11, № 1. p. 11-16.
131. Rechlies S. Ursachen zur Entstehung selbsterregter Schwingungen bei der Spanengen Bearbeitung // Maschinenbantechnik, 1977, 26, № 9. S 403-407.
132. Rehsteiner F., Meier P. Koordinieren des Vorschubes bei Fräsmaschinen zum optimalen Zerspanen // Maschinenmarkt, 1980, 86, № 33. S 653-656.
133. Scholz W. Selbsteregte Schwingungen bei der Zerspaltung // Maschine, 1972, 26, № 9. S. 47-48.

134. Sexton J., Stone B., Barr A. The stability of machining with continuously varying spindle speed // CIRP Ann. 1978, 27, № 1. p 321-326.
135. Stöferle T., Grab H. Vermeiden von Ratterschwingungen durch periodische Drehzahländerung // Werkstatt und Betrieb, 1972, 105, № 10, S 727-730.
136. Tanaka T., Okitsu A. Diagnostic sensing of tool wear by spectrum analysis of interrupted cutting forces // Bull. Jap. Soc. Prec. Eng., 1979, 13, № 1. p 45-46.
137. Vermeiden von Ratter-schwingungen beim Stirnfräsen // Ind.-Anz., 1978, 100, № 34. S 25-28.
138. Witte, D.L. Korrelationen zwischen Werkstoff und Schnittkraftkennwerten // Ind.-Anz., 1981, 103, № 10. S 34-35.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ИСХОДНЫЕ ТЕКСТЫ ОСНОВНЫХ ПРОГРАММ







```

TYPE 32
32  FORMAT(' УГОЛ НАКЛОНА СЕЧЕНИЯ' /
      * ' UGOL=',X)
      ACCEPT 23,UGOL
      TYPE 31,I
31  FORMAT(' *** СЕЧЕНИЕ ',I2,' ***' / /
      * ' ЧИСЛО          ТОЧЕК РАЗБИЕНИЯ          КОНТУРА
      ACCEPT 6,I1
      WRITE(1,22)I1,Z,UGOL
      DO 35 J=1,I1
49  TYPE 35,J
36  FORMAT(' ВВЕДИТЕ ЧЕРЕЗ          ЗАПЯТУЮ          ДЛЯ '
      #,I2,' ТОЧКИ РАЗБИЕНИЯ' /
      * ' КООРДИНАТЫ X          , Y          ВЕРХНЕЙ ТОЧКИ' /
      * ' X , Y          =',X)
      ACCEPT 23,FR(1),FR(2)
      TYPE 37
37  FORMAT(' КООРДИНАТЫ X , Y          НИЖНЕЙ ТОЧКИ' /
      * ' X , Y          =',X)
      ACCEPT 23,FR(3),FR(4)
      TYPE 38,(FR(K),K=1,4)
38  FORMAT(' ПРОВЕРЬТЕ ВВЕДЕННУЮ СТРОКУ' / /2X,4F10.5 / /
      * ' ЕСЛИ ХОТИТЕ ВНЕСТИ ИЗМЕНЕНИЯ,          ВВЕДИТЕ
      ACCEPT 2,KLU
      IF(KLU.EQ.1) GOTO 49
      WRITE(1,23)(FR(K),K=1,4)
39  CONTINUE
50  REMIND 1
51  RETURN
      END
      SUBROUTINE GEOMPR

```

0  
0  
0

#### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ЛОПАТКИ

```

      DIMENSION FR(5,30),FR1(5,15),CTG(2),T1(2),T2(2)
      DATA PI/3.1415926/
      READ(1,1)KOD
1   FORMAT(I1)
      READ(1,2)N
2   FORMAT(I2)
      READ(1,27)E,FG,RO
27  FORMAT(2F10.1,F10.5)
      TYPE 51
51  FORMAT(' ПРИПУСК НА ДАННУЮ ОПЕРАЦИЮ 'X)
      ACCEPT 4,FRIP1
      TYPE 52
52  FORMAT(' ПРИПУСК ПОСЛЕ ДАННОЙ ОПЕРАЦИИ 'X)
      ACCEPT 4,FRIP2
      TYPE 52
52  FORMAT(' КООРДИНАТА Z ГРАНИЦЫ ОБРАБОТАННОГО' /
      * ' И НЕОБРАБОТАННОГО УЧАСТКОВ          Z='X)
      ACCEPT 4,Z1
      TYPE 53
53  FORMAT(' ЕСЛИ НАПРАВЛЕНИЕ ОБРАБОТКИ' /
      * ' ОТ ХВОСТА К ГОЛОВЕ, ВВЕДИТЕ КОД 1          КОД='X)
      ACCEPT 1,KOD1
      WRITE(2,2)N
      WRITE(2,27)E,FG,RO
      DO 59 I=1,N
      TYPE 49,I

```

```

40  FORMAT(' GEHEHME ', I2)
    DNAR=0.
    DUN=0.
    READ(1, 3) II, Z, UGOL
3   FORMAT(I2, 2F10.5)
    FRIP=FRIP2
    IF(Z1.EQ.0.) GOTO 55
    IF(KOD1.NE.1) GOTO 56
    IF(Z.GT.Z1) FRIP=FRIP+FRIP1
    GOTO 57
56  IF(Z.LT.Z1) FRIP=FRIP+FRIP1
    GOTO 57
55  FRIP=FRIP+FRIP1
57  IF(KOD.NE.1) GOTO 10
    READ(1, 4)((FR(K, L), K=1, 5), L=1, II)
4   FORMAT(5F10.5)
    DO 11 K=1, II
    IF(FR(3, K).GT.0..AND.FR(3, K).LE.15.) GOTO 12
11  CONTINUE
    STOP ' ТОЧКА N НЕ ОПРЕДЕЛЕНА ** GEOMPR ** '
12  A=FR(4, K)-FR(4, II)
    UGOL=FR(5, K)-FR(5, II)
    UGOL=ATAN(UGOL/A)
    CTG(1)=0.
    CTG(2)=0.
    CALL NOUKON(FR, II, K, CTG, UGOL, FR1)
    UGOL=UGOL*180./PI
    B1=FR1(4, K)-FR1(4, II)+FR1(3, K)+FR1(3, II)
    A=0.
15  CALL TKON(FR1, II, K, 0, A, KK)
    CALL PER(FR1, II, KK, A, TN)
    CALL TKON(FR1, II, K, 1, A, KK)
    CALL PER(FR1, II, KK, A, TV)
    CTG(1)=TV-TN
    H1=CTG(1)
14  F1=FR1(5, K)-TV+H1/2.
    CALL DLDUG(FR1, II, K, DNAR, DUN)
    WRITE(2, 20) Z, B1, H1, F1, UGOL, DNAR, DUN, FRIP
20  FORMAT(3F10.5)
    GOTO 59
10  READ(1, 4)((FR(K, L), K=1, 4), L=1, II)
    B1=FR(1, II)
    DO 30 K=1, II-1
    A=FR(2, K)-FR(4, K)
    IF(A.LT.H1) GOTO 31
    H1=A
    KK=K
31  T1(1)=FR(1, K)
    T1(2)=FR(2, K)
    T2(1)=FR(1, K+1)
    T2(2)=FR(2, K+1)
    CALL RASTET(T1, T2, A)
    DNAR=DNAR+A
    T1(1)=FR(3, K)
    T1(2)=FR(4, K)
    T2(1)=FR(3, K+1)
    T2(2)=FR(4, K+1)
    CALL RASTET(T1, T2, A)
    DUN=DUN+A
30  CONTINUE

```

```

F1=FR(2, KK)-H1/2.
WRITE(2, 28)Z, B1, H1, F1, UGOL, DNAR, DUN, PRIF
58 CONTINUE
CALL CLOSE(1)
CALL MJLOP
RETURN
END
SUBROUTINE MJLOP

```

0  
0  
0  
0

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ  
СЕЧЕНИЯ ЛОПАТКИ

```

DIMENSION F(12), Z1(30)
REWIND 2
CALL ASSIGN(1, 'MJL.FIL')
READ(2, 1)N
1 FORMAT(12)
READ(2, 2)E, FG, RO
2 FORMAT(2F10.1, F10.5)
DO 3 I=1, N
4 READ(2, 4)Z1(I)
FORMAT(F10.5)
3 Z1(I)=Z1(I)/10.
CONTINUE
KLK=3
MJF=12
DO 5 I=1, MJF
5 F(I)=0.
CONTINUE
WRITE(1, 6)N, KLK, MJF
6 FORMAT(3I2)
WRITE(1, 7)(Z1(I), I=1, N)
7 FORMAT(5F10.5)
E=E*100.
FG=FG*100.
RO=RO*100.
12 WRITE(1, 12)E, FG, RO
FORMAT(5F10.1)
REWIND 2
READ(2, 1)N
READ(2, 2)E, FG, RO
DO 8 I=1, N
9 READ(2, 9)B1, H1, F1, UGOL, PRIF
FORMAT(10X, 4F10.5, 20X, F10.5)
B1=B1/10.
H1=H1/10.
F1=F1/10.
PRIF=PRIF/10.
B=B1+2.*PRIF
H=H1+2.*PRIF
FF=F1+PRIF
C=H/B
Q=FF/H
B2=B*B
B4=B2*B2
C3=C*C*C
F(1)=0.567*B2*C
F(2)=0.3333*0.457*B4*C3*(1+1.567*0.75*Q)
F(3)=0.3333*0.4*B4*C
F(4)=0.3333*0.457*B4*C3

```

```
D      F(5)=UGOL
      TYPE 10,F
      10  FORMAT(' F= ',5E12.4)
          WRITE(1,11)F
          11  FORMAT(12F10.3)
          8   CONTINUE
           RETURN
           END
```

0000

## ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СТРУКТУР

```

DIMENSION NAME(25)
LOGICAL*1 NAME
TYPE 1
1  FORMAT('/ ** ПРОГРАММА ФОРМИРОВАНИЯ' /
*  ** ИНФОРМАЦИОННЫХ СТРУКТУР' /)
TYPE 2
2  FORMAT(' ИМЯ ТАБЛИЦЫ ИЗВЕСТНО ? (1/0):')
ACCEPT 3, KLU
3  FORMAT(I2)
   IF(KLU.NE.0) GOTO 4
TYPE 5
5  FORMAT('/ ВВЕДИТЕ ИМЯ И ТИП ТАБЛИЦЫ')
ACCEPT 5, (NAME(I), I=1, 25)
FORMAT(25A1)
4  CALL ASSIGN(2, NAME)
TYPE 3
6  FORMAT('/ ВВЕДИТЕ ЧИСЛО ПОДТАБЛИЦ      N='*)
ACCEPT 3, NTAB
WRITE(2, 3)NTAB
DO 9 I=1, NTAB
TYPE 10, I
10  FORMAT('/ ** ПОДТАБЛИЦА      ', I2)
CALL FORTAB(NTAB, I)
9  CONTINUE
CALL CLOSE(2)
STOP
END
SUBROUTINE FORTAB(NTAB, NT)

```

0000

## ФОРМИРОВАНИЕ ТАБЛИЦЫ

```

DIMENSION ZAP(210, 20), NZN(20), IZAG1(35), IZAG2(35),
*  ZAP1(210, 20), NZN1(20)
LOGICAL*1 ZAP, ZAP1
TYPE 1
1  FORMAT('/      ФОРМИРОВАНИЕ ТАБЛИЦЫ' /
*  '*** ВВЕДИТЕ ЗАГОЛОВОК (НЕ БОЛЕЕ 2-Х СТРОК)')
ACCEPT 22, IZAG1, IZAG2
22  FORMAT(35A2-35A2)
2  FORMAT(I2)
TYPE 3
3  FORMAT('/ *** ПАРАМЕТРЫ ТАБЛИЦЫ:' /
*  ' ЧИСЛО ГРАФ      ')
ACCEPT 2, NGR
TYPE 4
4  FORMAT(' ЧИСЛО ПОЗИЦИЯ В ГРАФЕ (НЕ МЕНЕЕ 3)      ')
ACCEPT 2, NPOZ
   IF(NPOZ.LT.3) NPOZ=3
TYPE 5
5  FORMAT(' ОБЩЕЕ ЧИСЛО ЗАПИСЕЙ      ')
ACCEPT 2, NZAP
   NZAP=NZAP+1
WRITE(2, 50)NGR, NPOZ, NZAP, IZAG1, IZAG2
50  FORMAT(3I3, 79A2)
TYPE 6
6  FORMAT('/ *** ЗАПОЛНЯЕМ ТАБЛИЦУ' /)

```

```

DO 9 NZ=1,NZAP
CALL FORZAP(NGR,NPOZ,NZ,NZN,ZAP,NZN1,ZAP1)
IF(NZ.EQ.1) TYPE 31
IF(NZ.NE.1) TYPE 32,NZ-1
31 FORMAT(' ***** ФОРМИРУЕМ ШАПКУ')
32 FORMAT(' ***** ФОРМИРУЕМ ЗЯПИСЬ ',I3)
CALL ORGZAP(NGR,NPOZ,NZ,NZN,ZAP,NZN1,ZAP1)
WRITE(2,51)(NZN(I),I=1,NGR)
51 FORMAT(20I3)
DO 54 I=1,NGR
WRITE(2,52)(ZAP(J,I),J=1,NZN(I))
52 FORMAT(218A1)
54 CONTINUE
9 CONTINUE
STOP
END
SUBROUTINE FORZAP(NGR,NPOZ,NZ,NZN,ZAP,NZN1,ZAP1)
C
C      ФОРМИРОВАНИЕ ЗАПИСИ
C
DIMENSION ZAP(210,20),B(210),NZN(20),ZAP1(210,20),NZN
LOGICAL*1 ZAP,STR,IT,IF,IR,IU,B,ZAP1
DATA IT/'-'/,IF/' '/,IR/'='/,IU/'!'
D
D      TYPE 20
20 FORMAT(' ВВЕДИТЕ ЧЕРЕЗ ЗАПЯТУЮ: KLU,NGR,NZ ')
D
D      ACCEPT 21,KLU,NGR,NZ
21 FORMAT(3I5)
IF(NZ.EQ.1) TYPE 1
IF(NZ.NE.1) TYPE 2
1 FORMAT(' *** ВВЕДИТЕ НАИМЕНОВАНИЯ ГРАФ' )
2 FORMAT(' *** ВВЕДИТЕ СОДЕРЖИМОЕ ГРАФ' )
I=1
KLU=0
5 TYPE 4,I
4 FORMAT(' *** ГРАФА ',I2,' ***')
CALL UPLOT(B,NOM)
NZN(I)=NOM
IF(NZ.EQ.1) NZN1(I)=NZN(I)
DO 5 J=1,210
ZAP(J,I)=B(J)
IF(NZ.EQ.1) ZAP1(J,I)=B(J)
5 CONTINUE
IF(KLU.NE.0) GOTO 7
IF(I.EQ.NGR) GOTO 7
I=I+1
GOTO 5
7 TYPE 3
8 FORMAT(' *** ПРОВЕРЬТЕ ВВОД:')
DO 41 I=1,NGR
TYPE 10,I,(ZAP(J,I),J=1,210)
10 FORMAT(' ГРАФА ',I2/1X,70A1/1X,70A1/1X,70A1)
41 CONTINUE
TYPE 11
11 FORMAT(' *** БУДЕТЕ ВНОСИТЬ ИСПРАВЛЕНИЯ ? (1/0):')
ACCEPT 12,KLU
12 FORMAT(I2)
IF(KLU.EQ.0) GOTO 15
TYPE 14
14 FORMAT(' *** НОМЕР ГРАФЫ N=' )
ACCEPT 12,I

```

```

15      GOTO 5
      RETURN
      END
      SUBROUTINE UPLOT(B,NOM)
C
C
C          УПЛОТНЕНИЕ ЗАПИСИ
C
      DIMENSION A(210),B(210)
      LOGICAL*1 A,B,FR
      DATA FR/' '/
10     DO 3 I=1,210
      A(I)=FR
      B(I)=FR
3      CONTINUE
      TYPE 1
1      FORMAT('/ *** ВВЕДИТЕ СОДЕРЖИМОЕ ГРАФЫ' /
      *   (В СВОБОДНОМ ФОРМАТЕ, НЕ БОЛЕЕ 3 СТРОК)')
      ACCEPT 2,A
2      FORMAT(3(70A1<))
      NOM=0
      DO 4 I=1,209
      IF(A(I).EQ.FR) GOTO 5
      NOM=NOM+1
      B(NOM)=A(I)
      GOTO 4
5      IF(A(I+1).EQ.FR) GOTO 4
      NOM=NOM+1
      B(NOM)=A(I)
4      CONTINUE
      TYPE 6,NOM
6      FORMAT('/ ПРОВЕРЬТЕ ВВОД:          ЧИСЛО ЗНАКОВ      ',I3<)
      TYPE 7,B
7      FORMAT(3(' ',70A1<))
      TYPE 8
8      FORMAT('/ *** ЖЕЛАЕТЕ ИСПРАВИТЬ ? (1-0):')
      ACCEPT 9,KLU
9      FORMAT(I1)
      IF(KLU.NE.0) GOTO 10
      RETURN
      END
      SUBROUTINE ORGZAP(NGR,NPOZ,NZ,NZN,ZAP,NZN1,ZAP1,KOD)
C
C
C          ОРГАНИЗАЦИЯ ЗАПИСИ
C
      DIMENSION NZN(20),ZAP(210,20),NZN1(20),ZAP1(210,20)
      LOGICAL*1 ZAP
      I1=1
      NP=NPOZ+1
      I3=65-NP
      IF(I3.LT.NGR) GOTO 1
4     I2=NGR
      IF(KOD.NE.0)CALL PEZAP(NGR,NPOZ,1,NZN1,ZAP1,I1,I2)
      CALL PEZAP(NGR,NPOZ,NZ,NZN,ZAP,I1,I2)
      RETURN
1     I2=I3
      CALL PEZAP(NGR,NPOZ,1,NZN1,ZAP1,I1,I2)
5     CALL PEZAP(NGR,NPOZ,NZ,NZN,ZAP,I1,I2)
      TYPE 3
3     FORMAT(' *****   ДЛЯ ПРОДОЛЖЕНИЯ НАЖМИТЕ <BK>' )
      ACCEPT 2,I1

```

```

2      FORMAT(I2)
      I1=I2+1
      I2=I2+I3
      IF(I2.GE.NGR) GOTO 4
      GOTO 5
      END
      SUBROUTINE PEZAP(NGR,NPOZ,NZ,NZN,ZAP,I1,I2)
0
0
0
      DIMENSION ZAP(210,20),STR(210,15),NZN(20)
      LOGICAL*1 ZAP,STR,IT,IF,IR,IU,RAZD
      DATA IT/' ',IF/' ',IR/'=',IU/'!'
1      FORMAT(' ',70A1)
      RAZD=IT
      IF(NZ.EQ.1) RAZD=IR
      IF(NZ.EQ.2) RAZD=IR
      NF=0
      DO 2 I=I1,I2
2      NF=NF+NPOZ+1
      CONTINUE
      NF=NF+4
      TYPE 1,(RAZD,I=1,NF)
      NS=1
      DO 5 I=I1,I2
      NS1=NSN(I)+NPOZ+1
      IF(NS1.GE.N3) NS=NS1
5      CONTINUE
      K1=0
      DO 8 I=I1,I2
      K=0
      DO 7 L=1,NS
      DO 6 M=1,NPOZ
      K=K+1
      IF(K.GE.210) GOTO 9
      STR(K1+M,L)=ZAP(K,I)
      GOTO 6
9      STR(K1+M,L)=IF
6      CONTINUE
      STR(K1+NPOZ+1,L)=IU
7      CONTINUE
      K1=K1+NPOZ+1
8      CONTINUE
      NF=NF-4
      DO 10 I=1,NS
      IF(NZ.EQ.1) TYPE 11,(STR(K,I),K=1,NF)
      IF(NZ.NE.1.AND.I.EQ.1) TYPE 12,NZ-1,(STR(K,I),K=1,NF)
      IF(NZ.NE.1.AND.I.NE.1) TYPE 14,(STR(K,I),K=1,NF)
11      FORMAT(' N !',65A1)
12      FORMAT(1X,I3,'!',65A1)
14      FORMAT(' !',65A1)
10      CONTINUE
      RETURN
      END
0
0
0
      ИСПРАВЛЕНИЯ В ТАБЛИЦЕ
      DIMENSION NAME(25),IZAG1(35),IZAG2(35),ZAP(210,20),
      * ZAP1(210,20),NZN1(20),NZN(20)
      COMMON/START/NAME

```



```

LOGICAL*1 NAME,ZAF,ZAF1,POZ
TYPE 1
1  FORMAT(2X,70(' ')<25X,'ПРОГРАММА ИСПРАВЛЕНИЯ ТАБЛИЦ'<
*  2X,70(' ')<
*  'ВВЕДИТЕ РЕЖИМ РАБОТЫ:'<
*  1 - С ЯВНЫМ ЗАДАНИЕМ ИМЕНИ ТАБЛИЦЫ'<
*  2 - ИМЯ ТАБЛИЦЫ ИЗВЕСТНО'<      КОД='*')
ACCEPT 2,KOD
2  FORMAT(I2)
   GOTO(3,4),KOD
4  TYPE 5
5  FORMAT('<' ИМЯ ТАБЛИЦЫ ЗАВЕДЕНО ЧЕРЕЗ COMMON'<)
6  FORMAT(2A1)
32  CALL ASSIGN(1,NAME)
   CALL ASSIGN(2,'OTL.TAB')
267  READ(1,201,END=406,ERR=3)NTAB
   WRITE(2,201)NTAB
201  FORMAT(I2)
   NT=1
37  NOM=1
   READ(1,202,END=406,ERR=3)NGR,NPOZ,NZAF,IZAG1,IZAG2
384  TYPE 381,NT,NGR,NPOZ,NZAF
381  FORMAT('<' ПОДТАБЛИЦА ',I2,' ПАРАМЕТРЫ:'<
*  1 - ЧИСЛО ГРАФ.....',I3<
*  2 - ПОЗИЦИЯ В ГРАФЕ.....',I3<
*  3 - ЧИСЛО ЗАПИСЕЙ.....',I3<
*  'БУДЕТЕ МЕНЯТЬ ? (1/0):'*>
ACCEPT 2,KLU
IF(KLU.EQ.0) GOTO 382
TYPE 383
383  FORMAT('<' ВВЕДИТЕ НОМЕР ПАРАМЕТРА ',*')
ACCEPT 2,KLU
IF(KLU.LE.0.OR.KLU.GT.3) GOTO 384
GOTO (391,392,393),KLU
391  TYPE 394
394  FORMAT('<' ЧИСЛО ГРАФ ',*')
ACCEPT 2,NGR
GOTO 384
392  TYPE 395
395  FORMAT('<' ПОЗИЦИЯ В ГРАФЕ ',*')
ACCEPT 2,NPOZ
GOTO 384
393  TYPE 396
396  FORMAT('<' ЧИСЛО ЗАПИСЕЙ ',*')
NZAF1=NZAF
ACCEPT 2,NZAF
GOTO 384
382  WRITE(2,202)NGR,NPOZ,NZAF,IZAG1,IZAG2
202  FORMAT(3I3,70A2)
204  FORMAT(80A1)
33  READ(1,252,END=406,ERR=3)(NZN(I),I=1,NGR)
252  FORMAT(20I3)
   DO 400 J=1,NGR
   DO 401 JJ=1,210
ZAF(JJ,J)=' '
401  CONTINUE
READ(1,253,END=406,ERR=3)(ZAF(KK,J),KK=1,NZN(J))
253  FORMAT(210A1)
400  CONTINUE
IF(NOM.NE.1) GOTO 260

```

```

DO 255 I=1,NGR
NZN1(I)=NZN(I)
DO 255 J=1,210
ZAP1(J,I)=ZAP(J,I)
255 CONTINUE
260 IF(KOD.NE.9)TYPE 257,IZAG1,IZAG2
257 FORMAT(<2(1X,35A2)>)
CALL ORGZAP(NGR,NPOZ,NOM+1,NZN,ZAP,NZN1,ZAP1,KOD)
35 ACCEPT 2,KOD
IF(KOD.EQ.9) GOTO 36
TYPE 9
9 FORMAT(72(' ')// РЕЖИМЫ РАБОТЫ: ',
* ' 6-ЧТЕНИЕ СЛЕДУЮЩ. СТРО
#КМ'//
* ' 1-ИСПРАВЛЕНИЕ ЗАПИСИ 2-ПЕРЕХОД В СЛЕД. ПОДТ
#АБЛ.'//
* ' 3-УДАЛЕНИЕ ЗАПИСИ 4-ДОБАВЛЕНИЕ ЗАПИСИ'//
* ' 5-ПЕРЕДАЧА УПРАВЛЕНИЯ МОНИТОРУ КОД='*)
ACCEPT 2,KOD
IF(KOD.EQ.9) GOTO 36
GOTO(21,22,23,24,25),KOD
3 CALL CLOSE(1)
TYPE 36
36 FORMAT(<'ВВЕДИТЕ ИМЯ И ТИП ФАЙЛА')
ACCEPT 31,(NAME(I),I=1,12)
31 FORMAT(12A1)
GOTO 32
29 NOM=NOM+1
IF(NOM.LE.36.OR.NOM.LE.NZAP) GOTO 533
486 TYPE 34
34 FORMAT(<' КОНЕЦ ТАБЛИЦЫ'>)
NOM=NOM-1
GOTO 35
533 WRITE(2,252)(NZN(I),I=1,NGR)
DO 534 J=1,NGR
WRITE(2,253)(ZAP(KK,J),KK=1,NZN(J))
534 CONTINUE
GOTO 33
21 NOM=NOM+1
CALL FORZAP(NGR,NPOZ,NOM,NZN,ZAP,NZN1,ZAP1)
CALL ORGZAP(NGR,NPOZ,NOM,NZN,ZAP,NZN1,ZAP1,1)
GOTO 35
22 IF(NOM.GE.NZAP) GOTO 522
TYPE 577
577 FORMAT(<' ЗАПИСЬ НЕ ПОСЛЕДНЯЯ, ПЕРЕХОД НЕВОЗМОЖЕН !!
#!!!'>)
GOTO 35
522 NT=NT+1
IF(NT.GT.NTAB) GOTO 333
IF(NT.GT.3) GOTO 333
NN=NOM+1
IF(NN.GT.NZAP) GOTO 37
DO 258 I=NN,NZAP
READ(1,5)POZ
DO 258 J=1,NGR
READ(1,5)POZ
258 CONTINUE
GOTO 37
333 NT=NT-1
TYPE 38

```

```

38  FORMAT(// 'ПОДТАБЛИЦА ПОСЛЕДНЯЯ'//)
    GOTO 35
23  TYPE 588
588  FORMAT(// 'ЗАПИСЬ УДАЛЯЕТСЯ'//)
    GOTO 33
24  GOTO 21
25  CALL CLOSE(1)
    STOP
    END

C
C
C              ПРОГРАММА РАБОТЫ С ТАБЛИЦАМИ
C              START

    DIMENSION NAME(25), IZAG1(35), IZAG2(35), ZAP(210, 20),
*      ZAP1(210, 20), KD(35), NZN1(20), NZN(20)
    COMMON/START/NAME
    LOGICAL*1 KD, NAME, ZAP, ZAP1, POZ
    DATA KD/'1','2','3','4','5','6','7','8','9',
*         'A','B','C','D','E','F','G','H','I',
*         'J','K','L','M','N','O','P','Q','R',
*         'S','T','U','V','W','X','Y','Z'
    KD(0)='0'
    TYPE 1
1    FORMAT(2X, 70('-')/25X, 'ПРОГРАММА ИНСТРУКЦИЯ'//
*   2X, 70('-')//
*   'ВВЕДИТЕ РЕЖИМ ПОИСКА:'//
*   '1 - С ЯВНЫМ ЗАДАНИЕМ ИМЕНИ ТАБЛИЦЫ'//
*   '2 - ПО КОДУ ГЕНЕРАЛЬНОЙ ТАБЛИЦЫ'//      KOD='0')
    ACCEPT 2, KOD
2    FORMAT(I2)
    GOTO(3, 4), KOD
4    TYPE 5
5    FORMAT(// 'ВВЕДИТЕ КОД ГЕНЕРАЛЬНОЙ ТАБЛИЦЫ'//      KOD='0')
    DO 251, I=1, 25
251  NAME(I)='0'
    CONTINUE
    NAME(9)='.'
    NAME(10)='T'
    NAME(11)='A'
    NAME(12)='B'
    ACCEPT 5, (NAME(I), I=1, 2)
6    FORMAT(2A1)
    NJR=0
32   CALL ASSIGN(1, NAME)
207  READ(1, 201, END=495, ERR=3)NTAB
201  FORMAT(I2)
    NT=1
37   NJM=1
    READ(1, 202, END=495, ERR=3)NJR, NPOZ, NZAP, IZAG1, IZAG2
202  FORMAT(3I3, 70A2)
204  FORMAT(30A1)
33   READ(1, 252, END=495, ERR=3) (NZN(I), I=1, NJR)
252  FORMAT(20I3)
    DO 400 J=1, NJR
    DO 401 JJ=1, 210
401  ZAP(JJ, J)=' '
    CONTINUE
    READ(1, 253, END=495, ERR=3) (ZAP(KK, J), KK=1, NZN(J))
253  FORMAT(210A1)
495  CONTINUE

```

```

      IF(NOM.NE.1) GOTO 250
      DO 255 I=1,NGR
      NZN1(I)=NZN(I)
      DO 255 J=1,210
      ZAP1(J,I)=ZAP(J,I)
255   CONTINUE
260   IF(KOD.NE.0)TYPE 257,IZAG1,IZAG2
257   FORMAT(<2(1X,35A2)>)
      CALL ORGZAP(NGR,NPOZ,NOM+1,NZN,ZAP,NZN1,ZAP1,KOD)
35   ACCEPT 2,KOD
      IF(KOD.EQ.0) GOTO 20
      TYPE 9
9     FORMAT(72(' ')// 'РЕЖИМЫ РАБОТЫ:',
*     #KI'//                               0-ЧТЕНИЕ СЛЕДУЮЩ.СТРО
*     #' 1-ЧТЕНИЕ ПРЕДЫДУЩ.СТРОКИ         2-ПЕРЕХОД В СЛЕД.ПОДТ
#АБЛ.'//
*     #' 3-ПЕРЕХОД В ПРЕДЫДУЩ.ПОДТАБЛ     4-НА СЛЕД.УРОВ.ПО N С
#ТФ.'//
*     #' 5-ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ УСЛ. I          6-ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ УСЛ.
# IJ'//
*     #' 7-ПЕРЕХОД ПО ИМЕНИ ФАЙЛА         8-ПЕРЕДАЧА УПРАВЛ.МОН
#ИТОРУ'//
*     #   KOD=' ')
      ACCEPT 2,KOD
      IF(KOD.EQ.0) GOTO 20
      GOTO(21,22,23,24,25,26,3,41),KOD
3   CALL CLOSE(1)
      TYPE 30
30   FORMAT(<'ВВЕДИТЕ ИМЯ И ТИП ФАЙЛА')>
      ACCEPT 31,(NAME(I),I=1,12)
31   FORMAT(12A1)
      GOTO 32
20   NOM=NOM+1
      IF(NOM.LE.36.OR.NOM.LE.NZAP) GOTO 33
405  TYPE 34
34   FORMAT(<'>' ' КОНЕЦ ТАБЛИЦЫ' <'>)
      NOM=NOM-1
      GOTO 35
21   NOM=NOM-1
      IF(NOM.LT.1)GOTO 205
      DO 405 I=1,2
      DO 256 J=1,NGR
      BACKSPACE 1
256  CONTINUE
      BACKSPACE 1
405  CONTINUE
      GOTO 33
205  NOM=NOM+1
      TYPE 35
35   FORMAT(<'>' ' НАЧАЛО ТАБЛИЦЫ' <'>)
      GOTO 35
22   NT=NT+1
      IF(NT.GT.NTAB) GOTO 333
      IF(NT.GT.3) GOTO 333
      NN=NOM+1
      IF(NN.GT.NZAP) GOTO 37
      DO 258 I=NN,NZAP
      READ(1,5)POZ
      DO 258 J=1,NGR

```

```

      READ(1,6)POZ
258  CONTINUE
      GOTO 37
333  NT=NT-1
      TYPE 38
38   FORMAT('/' ПОДТАБЛИЦА ПОСЛЕДНЯЯ' /)
      GOTO 35
23   NT=NT-1
      IF(NT.LT.1) GOTO 296
      REWIND 1
      IF(NT.EQ.1) GOTO 297
      READ(1,201)KLU
      DO 265 I=1,NT-1
      READ(1,201)KLU
      DO 265 J=1,NZAP
      READ(1,201)KLU
      DO 265 K=1,NGR
      READ(1,6)POZ
265  CONTINUE
      GOTO 37
296  NT=NT+1
      TYPE 39
39   FORMAT('/' ПОДТАБЛИЦА ПЕРВАЯ' /)
      GOTO 35
24   IF(NT.EQ.3.AND.NTAB.NE.1) GOTO 298
      IF(NT.EQ.1.AND.NTAB.EQ.1) GOTO 298
      TYPE 299
299  FORMAT('/' НЕДОПУСТИМАЯ КОМАНДА ' /)
      GOTO 35
298  NUR=NUR+1
      CALL CLOSE(1)
      NAME(2+NUR)=KD(NOM-1)
      GOTO 32
25   NUR=NUR+1
      TYPE 139
139  FORMAT(' ВВЕДИТЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ КОД I ' /)
      ACCEPT 31,NAME(2+NUR)
      CALL CLOSE(1)
      GOTO 32
26   NUR=NUR+2
      TYPE 40
40   FORMAT(' ВВЕДИТЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ КОДЫ IJ ' /)
      ACCEPT 31,NAME(1+NUR),NAME(2+NUR)
      CALL CLOSE(1)
      GOTO 32
41   CALL CLOSE(1)
      STOP
      END

```

```

00
00
00      ПРОГРАММА  МКЕ
      CALL ASSIGN(2,'MJL.FIL')
      CALL ASSIGN(4,'LOF.FIL')
      CALL MKENL
15     STOP
      END
      SUBROUTINE FORZAK(N,Z1,NB,NBC,NFIX,C)
00
00      ФОРМИРОВАНИЕ УСЛОВИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ
00
      DIMENSION NBC(6),Z(6),NFIX(6,6),Z1(36),IC(6),C(6,6)
      DATA IC/'X','Y','MX','MY','MZ','BZ'/
      TYPE 40
40     FORMAT(' БУДЕТЕ МЕНЯТЬ УСЛОВИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ? (1/0):')
      ACCEPT 6,KLUK
      IF(KLUK.NE.1) RETURN
      DO 35 I=1,6
      DO 35 J=1,6
      C(I,J)=0.
35     NFIX(I,J)=0
55     TYPE 4
4     FORMAT(' ВВЕДИТЕ ЧИСЛО ЗАКРЕПЛЯЕМЫХ ТОЧЕК      N='*)
      ACCEPT 5,NB
5     FORMAT(I5)
      IF(NB.GT.6) STOP ' ЧИСЛО ТОЧЕК > 6'
6     FORMAT(I2)
      DO 7 I=1,NB
12    TYPE 8,I
8     FORMAT(' ГРАНИЧНОЕ УСЛОВИЕ      ',I2)
      * ВВЕДИТЕ КООРДИНАТУ Z (ММ, С ДЕСЯТИЧНОЙ ТОЧКОЙ !!!):
      # Z='*')
      ACCEPT 3,Z(I)
3     FORMAT(F10,5)
      Z(I)=Z(I)-10.
      IF(Z(I).GE.Z1(1)) GOTO 10
      TYPE 11
11    FORMAT(' ОЧЕНЬ МАЛЕНЬКОЕ ЧИСЛО')
      GOTO 12
10    IF(Z(I).LE.Z1(N)) GOTO 14
      TYPE 15
15    FORMAT(' ОЧЕНЬ БОЛЬШОЕ ЧИСЛО')
      GOTO 12
14    DO 9 J=1,N-1
      IF(Z(I).GE.Z1(J).AND.Z(I).LE.Z1(J+1)) GOTO 16
9     CONTINUE
      STOP ' ОШИБКА ПРИ ВВОДЕ КООРДИНАТЫ Z'
16    A=ABS(Z(I)-Z1(J))
      B=ABS(Z(I)-Z1(J+1))
      NBC(I)=J
      IF(B.LT.A) NBC(I)=J+1
      TYPE 17,I
17    FORMAT(' УСЛОВИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ В  ',I2,' ТОЧКЕ:')
      DO 18 J=1,6
      TYPE 19,IC(J)
19    FORMAT(' НАЛИЧИЕ СВЯЗИ В НАПРАВЛЕНИИ  ',A2,' (1/0):')
      ACCEPT 20,NFIX(I,J)
20    FORMAT(I1)
18    CONTINUE

```

```

21 TYPE 21
   FORMAT(' ЖЕСТКОСТИ МЕНЬШЕ 1000000 КГ*ММ ? (1/0): '
   ACCEPT 20,KLUK
   IF(KLUK.EQ.1) GOTO 22
   DO 23 J=1,6
23 IF(NFIX(I,J).EQ.1) C(I,J)=1.E15
   GOTO 24
22 DO 25 J=1,6
   IF(NFIX(I,J).NE.1) GOTO 25
   TYPE 26,IC(J)
26 FORMAT(' ЖЕСТКОСТЬ В НАПРАВЛЕНИИ ',A2,' = '* )
   ACCEPT 27,C(I,J)
27 FORMAT(F10.1)
25 CONTINUE
7 CONTINUE
24 TYPE 30,NB
30 FORMAT(' ПРОВЕРЬТЕ ВВОД' //
   * ЧИСЛО ТОЧЕК ЗАКРЕПЛЕНИЯ ',I2)
   DO 31 I=1,NB
   TYPE 32,I,Z(I),NBC(I),IC
32 FORMAT(' ТОЧКА ',I2,' КООРДИНАТА Z ',F10.4,
   * УЗЕЛ ',I2'
   * УСЛОВИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ : ' // КОД ',5(' C(',A2,' ) ' )
   #)
   TYPE 33,(NFIX(I,J),J=1,6),(C(I,J),J=1,6)
33 FORMAT(1X,6I1,1X,6(1X,E10.3))
31 CONTINUE
   TYPE 34
34 FORMAT(' ИМЕЮТСЯ ОШИБКИ ? (1/0): '* )
   ACCEPT 5,KLUK
   IF(KLUK.EQ.1) GOTO 55
   WRITE(1,37)NB
37 FORMAT(' УСЛОВИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ' //
   * ЧИСЛО ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ',I2)
   DO 36 I=1,NB
   G1=Z(I)*10.
   WRITE(1,32)I,G1,NBC(I),IC
   WRITE(1,33)(NFIX(I,J),J=1,6),(C(I,J),J=1,6)
36 CONTINUE
   RETURN
   END
   SUBROUTINE FORSIL(NUS,N,XNUC,PR)

   BEKTOP СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

   DIMENSION XNUC(NUS),PR(N),IC(5),S(2)
   DATA IC/'X','Y','MX','MY','MZ'/
   DO 1 I=1,N
1 PR(I)=0.
   TYPE 2
2 FORMAT(' ФОРМИРУЕМ ВЕКТОР ВНЕШНЕЙ СИЛЫ' //
   * ВНЕШНЯЯ СИЛА ДЕЙСТВУЕТ ? (1/0): '* )
   ACCEPT 3,KLUK
3 FORMAT(I2)
   IF(KLUK.NE.1) GOTO 4
   TYPE 5
5 FORMAT(' КООРДИНАТА Z ТОЧКИ ПРИЛОЖЕНИЯ СИЛЫ' //
   * Z='* )
   ACCEPT 7,Z1
   Z=Z1*10.

```

```

7   FORMAT(F10.5)
   DO 8 K=1,NUS-1
   IF(Z.GE.XNUC(K).AND.Z.LE.XNUC(K+1)) GOTO 9
8   CONTINUE
   IF(Z.LE.XNUC(1)) K=1
   IF(Z.GE.XNUC(NUS)) K=NUS
   GOTO 10
9   A=ABS(Z-XNUC(K))
   B=ABS(Z-XNUC(K+1))
   IF(A.GT.B)K=K+1
10  K=(K-1)*6
   TYPE 5
5   FORMAT(' ВВЕДИТЕ КОД ЗАДАНИЯ СИЛЫ :')
   *' 1 - ВЕЛИЧИНА И НАПРАВЛЕНИЕ СИЛЫ'
   *' 2 - FX, FY, MX, MY, MZ'
   *' 3 - ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ РАСЧЕТОМ'
   *'   КОД = '*)
   ACCEPT 3,KLUK
   GOTO (11,12,14),KLUK
11  TYPE 15
15  FORMAT(' ТОЧКА ПРИЛОЖЕНИЯ СИЛЫ :')
   DO 16 I=1,2
   TYPE 17,IC(I)
17  FORMAT(' КООРДИНАТА ',A2,' (MM) =')
   ACCEPT 7,S(I)
16  CONTINUE
   TYPE 18
18  FORMAT(' ВЕЛИЧИНА СИЛЫ (КГ) ')
   ACCEPT 7,F
   TYPE 19
19  FORMAT(' УГОЛ МЕЖДУ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ'
   *' СИЛЫ И ОСИ X (ГРАД. , ПРОТИВ ЧАС.СТР.) ')
   ACCEPT 7,U60L
   WRITE(1,70)Z1,S,F,U60L
70  FORMAT(' СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ (КОД ЗАДАНИЯ - 1)')
   *' ТОЧКА ПРИЛОЖЕНИЯ: Z=',E12.4,' X=',E12.4,' Y=',E12.4
   *' ВЕЛИЧИНА СИЛЫ      ',E12.4
   *' УОЛ К ОСИ X        ',E12.4)
   U60L=U60L*3.1415926*180.
   FR(K+1)=FR(K+1)+F*COS(U60L)

   FR(K+2)=FR(K+2)+F*SIN(U60L)
   FR(K+5)=FR(K+5)+(FR(K+2)*S(1)-FR(K+1)*S(2))/10.
   GOTO 4
12  TYPE 20
20  FORMAT(' ВВЕДИТЕ СООТВЕТСТВУЮЩИЕ СИЛЫ :')
   DO 21 I=1,5
   TYPE 22,IC(I)
22  FORMAT(' F ',A2,' = ')
   ACCEPT 7,FR(K+I)
21  CONTINUE
   WRITE(1,71)Z1,IC,(FR(K+I),I=1,5)
71  FORMAT(' СОСРЕДОТОЧЕННАЯ СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 2)')
   *' ТОЧКА ПРИЛОЖЕНИЯ: Z=',E12.4
   *' СИЛОВ.ПАРАМЕТРЫ: ',5(SX,A2,SX)
   *'                   ',5(IX,E12.4))
   GOTO 4
14  CONTINUE
4   TYPE 31
31  FORMAT(' ФОРМИРУЕМ ВЕКТОР ПОВЕРХНОСТНЫХ СИЛ'
   *' ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ УЧИТЫВАЮТСЯ ? (1/0):')

```



```

ACCEPT 3,KLUK
IF(KLUK.NE.1) RETURN
TYPE 32
32 FORMAT('/ ВВЕДИТЕ КОД ЗАДАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ СИЛЫ :'/
* 1 - ИНТЕГРАЛЫ НАПРЯЖЕНИЯ QUN, QNAR'/
* 2 - ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ РАСЧЕТОМ'/
* KOD = 'x)
ACCEPT 3,KLUK
GOTO (33,34),KLUK
33 TYPE 35
35 FORMAT(' ВВЕДИТЕ ЧЕРЕЗ ЗАПЯТУЮ :'/
* QUN , QNAR (Н*ММ) = 'x)
ACCEPT 36,QUN,QNAR
WRITE(1,73)QUN,QNAR
73 FORMAT('/ ПОВЕРХН. СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 1)'/
* QUN=',E12.4,' QNAR=',E12.4)
36 FORMAT(2F10.5)
READ(4,3)KLUK
READ(4,7)F
READ(4,43)H1,UGOL,DNAR,DUN,PRIP
43 FORMAT(20X,F10.5,10X,4F10.5)
DO 45 I=2,NUS
READ(4,43)H1,UGOL,DNAR,DUN,PRIP
PU=DUN*QUN
PN=DNAR*QNAR
H=H1/2.+PRIP
I1=(I-1)*6
F=(PU-PN)*H/100.
UGOL=UGOL*3.1415926/180.
PR(I1+3)=PR(I1+3)+F*COS(UGOL)
PR(I1+4)=PR(I1+4)+F*SIN(UGOL)
45 CONTINUE
REWIND 4
GOTO 500
34 CONTINUE
500 WRITE(1,75)IC,K,(PR(K+1),I=1,5)
75 FORMAT('/ ВЕКТОР СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ'/
* УЗЕЛ',5(5X,A2,4X)/2X,I2,1X,5(1X,F10.5))
RETURN
END
SUBROUTINE KORTOK(PR,NUS,NEQ,XNUS)

```

C  
C  
C

ВЕКТОР ДЕФОРМАЦИИ В ТОЧКЕ

```

DIMENSION PR(NEQ),S(5),XNUS(NUS)
14 TYPE 1
1 FORMAT(' БУДЕТЕ ОПРЕДЕЛЯТЬ ВЕКТОР'/
* ДЕФОРМАЦИИ В ТОЧКЕ ?(1/0):'x)
ACCEPT 2,KLUK
2 FORMAT(I2)
IF(KLUK.NE.1) RETURN
5 TYPE 3
3 FORMAT(' ВВЕДИТЕ ЧЕРЕЗ ЗАПЯТУЮ'/
* КООРДИНАТЫ ТОЧКИ :'/
* Z, X, Y (ММ) = 'x)
ACCEPT 4,S
4 FORMAT(3F10.5)
10 TYPE 5
5 FORMAT(' ПРОВЕРЬТЕ :')
TYPE 12,(S(I),I=1,3)

```

```

12  FORMAT(' Z=',F10.5,' X=',F10.5,' Y=',F10.5)
    TYPE 25
25  FORMAT(' ЖЕЛАЕТЕ ИСПРАВИТЬ ? (1-0):')
    ACCEPT 2,KLUK
    IF(KLUK.EQ.1) GOTO 5
    WRITE(1,50)(S(I),I=1,3)
50  FORMAT(' ДЕФОРМАЦИЯ В ТОЧКЕ: Z=',E12.4,' X=',E12.4,
*   Y=',E12.4)
    S(1)=S(1)*10.
    DO 7 K=1,NUS-1
    IF(S(1).GE.XNUS(K).AND.S(1).LE.XNUS(K+1)) GOTO 8
7   CONTINUE
    TYPE 9
9   FORMAT(' ОШИБКА ПРИ ВВОДЕ !!!')
    TYPE 30
30  FORMAT(' БУДЕТЕ ПРОДОЛЖАТЬ ? (1-0):')
    ACCEPT 2,KLUK

C
C   SUBROUTINE FREZMJ(F)
C   NIHI-РАСЧЕТ КООРДИНАТ ТОЧЕК ЗУБА ФРЕЗЫ
C   ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:
C   RB-РАДИУС ФРЕЗЫ
C   H1-ВЫСОТА ЗУБА ФРЕЗЫ
C   F-ВЕЛИЧИНА ФАСКИ ЗУБА
C   F2-ВЕЛИЧИНА ВОСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ФАСКИ ЗУБА
C   BG-ПЕРЕДНИЙ УГОЛ ЗУБА
C   KOLZUB-КОЛИЧЕСТВО ЗУБОВ ФРЕЗЫ
C   BA-ЗАДНИЙ УГОЛ ЗУБА
C   BA2-ВОСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ ЗАДНИЙ УГОЛ ЗУБА
C   RM-РАДИУС ЗАКРУГЛЕНИЯ КАНАВКИ
C   RS-РАДИУС СПИНКИ ЗУБА
C   ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ:
C   T-КООРДИНАТЫ ТОЧЕК ЗУБА
C
    DIMENSION T(6,10),F(5)
    CALL FALIM(1,'С ДАННЫМИ О ФРЕЗЕ.')
    READ(1,20)KOLZUB
20  FORMAT(I3)
    READ(1,7)RB,H1,FAS,BG,BA,RM,F2,BA2,RS
7   FORMAT(F10.5)
D   TYPE 3, RB, H1, FAS, BG, BA, RM, F2, BA2, RS, KOLZUB
8   FORMAT(2X, 'FORMAT-9, NIHI:BBOD' /9F5.1, I3)
    Z=3.1415926/130.
    BEP=350./KOLZUB
    N=3
    BG=BG*Z
    BEP=BEP*Z
    BA=BA*Z
    BA2=BA2*Z
    DO 9 J=1,N
    DO 9 I=1,6
    T(I,J)=0.
9   CONTINUE
    T(1,1)=-RB
    T(1,3)=T(1,1)
    T(1,2)=H1-RB-RM
    T(2,2)=T(1,2)*SIN(BG)/COS(BG)
    T(1,3)=-RB+H1
    XZ=0.
    YZ=0.

```

```

T(1,5)=T(1,3)*COS(BEP)+T(2,3)*SIN(BEP)
T(2,5)=-T(1,3)*SIN(BEP)+T(2,3)*COS(BEP)
T(1,7)=-RS+FA3*SIN(BA)/COS(BA)
T(2,7)=FA3
BAK=(F2-FA3)/COS(BA+BA2)
T(1,6)=T(1,7)+BAK*SIN(BA+BA2)
T(2,6)=F2
IF(RS.EQ.0.)GOTO4
T(3,5)=RS
CALL FORO(T(1,5),T(1,6),T(2,5),T(2,6),RS,RS,X1,X2,Y1,Y2
#)
T(4,5)=X1
T(5,5)=Y1
X2=0.
Y2=0.
4 DO 11 I=1,6
T(I,N)=T(I,1)
11 CONTINUE
D TYPE 14,((T(I,J),I=1,6),J=1,N)
14 FORMAT(2X,'FORMAT-14,HIHI:BBB04'/(6F10.5))
H1=1.
D TYPE 100,KOLZUB,N,H1
100 FORMAT(2I3,F7.3)
D TYPE 101,((T(I,J),I=1,6),J=1,N)
101 FORMAT(6F7.3)
CALL MOMJFR(KOLZUB,N,H,T,F)
STOP
END
SUBROUTINE IRON1(NZUB,R)

```

0000

ВВОД ДАННЫХ ПО ФРЕЗЕ

```

DIMENSION R(8),FR(8)
DATA FR/'RS','F1','ALF','GAMMA','R','F','HZUB','RFR'/
NZUB=0
DO 1 I=1,8
R(I)=0
1 CONTINUE
CALL ASSIGN(1,'TI:')
WRITE(1,2)NZUB,R
2 FORMAT(24(' '),'*')
* 25(' '),'*'
* 23(' '),5(' '*')
* 24(' '),0,3(' '),,'ЧИСЛО'
* 22(' '),'* \,7(' '),,'ЗУБЬЕВ'
* 17(' '),'\ * \,6(' '),,'* *'
* 15(' '),6 * ,3(' '),'\ '
* 1X,15('_ '),0 \RS=',F5.1,'\ '
* ' !,13(' '),'\,7('_ '),'\ '
* ' !,13(' '),'* ,14(' '),'\ '
* ' !F1=',F5.1,21(' '),'\ '
* ' !,12(' '),,* ALF=',F5.1,7(' '),'\ '
* ' !,3(' '),_ !,12('_ '),3(' '),'\ '
* ' !,10(' '),! *,20(' '),'\ '
* ' !,3(' '),7!,22(' '),'\ '
* ' !,3('_ '),0 GAMMA=',F5.1,4(' '),R=',F5.1
* ' !,3(' '),* ,7('_ '),! 0** ,7('_ '),'\ '
* ' !,3(' '),* ,3(' '),* 2 * ,10(' '),'\ '
* ' !F=',F5.1, * ,* ! / * ,10(' '),'\ '
* ' !,7(' '),8* * ,5(' '),! ,6(' '),* ,11(' '),'\ '
#'\ '

```

```

* ' ',11(' '), '0',15(' '), '0',12(' '), '0' /
* 11(' '), '1' NZUB=' F5.1,4(' '), '*3',10(' '), '4' /
* 12(' '), '1',15(' '), '1',12(' '), '1' /
* 12(' '), '1',7(' '), 'RFR=' F5.1,12(' '), '1' /
* 12(' '), '1',28(' '), '1' /
TYPE 3
3 FORMAT(' -ВВЕДИТЕ ЧИСЛО ЗУБЬЕВ N=' ,*)
ACCEPT 4,NZUB
4 FORMAT(I2)
DO 5 I=1,3
TYPE 6,FR(I)
6 FORMAT(5X,A4,' =',*)
ACCEPT 7,R(I)
7 FORMAT(F10.5)
5 CONTINUE
WRITE(1,2)NZUB,R
RETURN
END
SUBROUTINE PORO(CA1,CA2,CB1,CB2,CR1,CR2,X1,X2,Y1,Y2)
C *****
C *****РАСЧЕТ ТОЧЕК ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ДВУХ ОКРУЖНОСТЕЙ
C ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C CA1-КООРДИНАТА X ЦЕНТРА ПЕРВОЙ ОКРУЖНОСТИ
C CA2-КООРДИНАТА X ЦЕНТРА ВТОРОЙ ОКРУЖНОСТИ
C CB1-КООРДИНАТА Y ЦЕНТРА ПЕРВОЙ ОКРУЖНОСТИ
C CB2-КООРДИНАТА Y ЦЕНТРА ВТОРОЙ ОКРУЖНОСТИ
C CR1-ВЕЛИЧИНА РАДИУСА ПЕРВОЙ ОКРУЖНОСТИ
C CR2-ВЕЛИЧИНА РАДИУСА ВТОРОЙ ОКРУЖНОСТИ
C ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C X1-КООРДИНАТА X ПЕРВОЙ ТОЧКИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ
C X2-КООРДИНАТА X ВТОРОЙ ТОЧКИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ
C Y1-КООРДИНАТА Y ПЕРВОЙ ТОЧКИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ
C Y2-КООРДИНАТА Y ВТОРОЙ ТОЧКИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ
C *****
CBQ1=(CA1-CA2)*(CA1-CA2)+(CB1-CB2)*(CB1-CB2)
CBQ2=(CR1+CR2)*(CR1+CR2)
IF(CBQ2.LT.CBQ1)STOP799
CBA=2.*(CA2-CA1)
CBS=2.*(CB2-CB1)
CBC=CA1*CA1-CA2*CA2+CB1*CB1-CB2*CB2+CR2*CR2-CR1*CR1
CCM=(CBS*CBS)-(CBA*CBA)+1.
CCN=2.*(CBS*CBC-(CBA*CBA)+CBS*CA1-CBA*CB1)
CCF=CB1*CB1+CA1*CA1-CR1*CR1+2.*(CBC*CA1-CBA+(CBC*CBC)-(C
#BA*CBA)
CQ=CCN*CCN-4*CCM*CCF
D WRITE(1,5)CBA,CBS,CBC,CCM,CCN,CCF,CQ
5 FORMAT(2X,' FORMAT-5, SUB:PORO' /5X,' CBA=' ,F10.4,2X,' CBS='
#,F10.4,
*2X,' CBC=' ,F10.4/5X,' CCM=' ,F10.4,2X,' CCN=' ,F10.4,
*2X,' CCF=' ,F10.4/12X,' CQ=' ,F10.4)
IF(CQ.LT.0.)STOP797
Y1=(-CCN-SQRT(CQ))/(2.*CCM)
Y2=(-CCN+SQRT(CQ))/(2.*CCM)
X1=(-CBS*Y1-CBC)/CBA
X2=(-CBS*Y2-CBC)/CBA
D WRITE(1,3)X1,Y1,X2,Y2
9 FORMAT(2X,' FORMAT-9, SUB:PORO' /5X,' X1=' ,F10.4,
*2X,' Y1=' ,F10.4,2X,' X2=' ,F10.4,2X,' Y2=' ,F10.4)
RETURN
END

```

SUBROUTINE MOMJFR(KOLZUB, N, H, FR, F)

```

C
C
C      ПРОГРАММА MOMJFR
C      РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СЕЧЕНИЯ ФРЕЗЫ
C
      DIMENSION FR(6,10),FTN(2,40),FTU(2,40),XTEK(40),YCT(40)
      #,F(5)
      CALL ZUBKOR(FR,N,H,FTN,FTU,XTEK,I)
D      TYPE 101,I,(XTEK(J),(FTN(K,J),FTU(K,J),K=1,2),J=1,I)
101  FORMAT(2X,'FORMAT-101,MOMJFR',5X,'I=',I3
      * (2X,E12.4,2(2(2X,E12.4)))
      CALL ZUBIK(FTN,FTU,XTEK,I,YCT,SJX,SJY,SJXY,SZUB,H)
D      TYPE 102,SJX,SJY,SJXY,SZUB,H,(YCT(J),J=1,I)
102  FORMAT(2X,'FORMAT-102,MOMJFR',2X,'SJX=',E12.4,
      * 2X,'SJY=',E12.4,2X,'SJXY=',E12.4,2X,'SZUB=',E12.4,
      * 2X,'H=',E12.4/2X,'YCT='/(E12.4)
      CALL GMSESH(KOLZUB,SJX,SJY,SJXY,ALF0,SZUB,BJU,BJU,SS,SO
      #JX,
      *SOJY,SOJXY,ALF1)
      BJK=BJU+BJU
D      TYPE 7,SOJX,SOJY,SOJXY,ALF1,BJU,BJU,BJK,SS
7  FORMAT(
      *'      ОСЕВОЙ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ПО ОСИ X,',15(' '),F10.1/
      *'      ОСЕВОЙ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ПО ОСИ Y,',15(' '),F10.1/
      *'      ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ,',13(' '),F10.1/
      *'      УГОЛ НАКЛОНА ГЛАВНЫХ ОСЕЙ ИНЕРЦИИ,',12(' '),F10.1/
      *'      ГЛАВНЫЙ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ СЕЧЕНИЯ ФРЕЗЫ,ОСЬ U,',3(' ')
      #),F10.1/
      *'      ГЛАВНЫЙ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ СЕЧЕНИЯ ФРЕЗЫ,ОСЬ V,',3(' ')
      #),F10.1/
      *'      КРУТЯЩИЙ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ,',22(' '),F10.1/
      *'      ПЛОЩАДЬ СЕЧЕНИЯ ФРЕЗЫ,',24(' '),F10.1/
      F(1)=SS
      F(2)=BJU
      F(3)=BJU
      F(4)=BJK
      F(5)=ALF1
      STOP
      END
SUBROUTINE ZUBKOR(FR,N,H,FTN,FTU,XTEK,I)
C
C      КООРДИНАТЫ УЧАСТКОВ ЗУБА ФРЕЗЫ
C      ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C      FR-ИСХОДНЫЕ КООРДИНАТЫ ТОЧЕК СЕЧЕНИЯ
C      ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C      FTN-НИЖНИЕ ТОЧКИ КОНТУРА ЗУБА
C      FTU-ВЕРХНИЕ ТОЧКИ КОНТУРА ЗУБА
C
      DIMENSION FR(6,10),FTN(2,40),FTU(2,40),C(3),T(2),XTEK(4
      #5)
D      WRITE(1,73)N,H
73  FORMAT(2X,'FORMAT-73,SUB:ZUBKOR',5X,'N=',I5,5X,'H=',E12
      #.4)
D      WRITE(1,74)((FR(K,L),K=1,6),L=1,N)
74  FORMAT(2X,'FORMAT-74,SUB:ZUBKOR',(6E12.4))
      G1=-100.
      DO 55 I=1,N
      IF(FR(1,I).LT.G1)GOTO 55
      G1=FR(1,I)
      ISR=I

```

```

55 CONTINUE
D WRITE(1,333) IGR
333 FORMAT(2X, 'FORMAT-333, SUB: ZUBKOR' /5X, ' IGR=', I5)
   I=1
   XTEK(I)=FR(1,1)+H/2.
D WRITE(1,43) I, XTEK(I), FR(1, IGR)
43 FORMAT(2X, 'FORMAT-43, SUB: ZUBKOR' /5X, ' I=', I5, 3X, ' XTEK=',
#E12.4,
*3X, 'FR=', E12.4)
C
C      КОЭФФИЦИЕНТ УРАВНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРЯМОЙ
C
C(1)=1.
C(2)=0.
7 C(3)=-XTEK(I)
D WRITE(1,44) I, XTEK(I)
44 FORMAT(2X, 'FORMAT-44, SUB: ZUBKOR' /5X, ' I=', I5, 3X, ' XTEK=',
#E12.4)
C
C      ТОЧКА ПЕРЕСЕЧЕНИЯ НА НИЖНЕМ КОНТУРЕ
C
DO 10 J=1, IGR-1
C
C      УЧАСТОК КОНТУРА ,ГДЕ ЕСТЬ ТОЧКА X
C
IF(XTEK(I).GE.FR(1, IGR))GOTO 25
IF(XTEK(I).GE.FR(1, J).AND.XTEK(I).LE.FR(1, J+1))GOTO 11
10 CONTINUE
11 CALL VIBKON(FR, J, C, T)
D WRITE(1,555) T
555 FORMAT(2X, 'FORMAT-555, SUB: ZUBKOR' /10X, ' T=', 2E12.4)
FTN(1, I)=T(1)
FTN(2, I)=T(2)
C
C      ТОЧКА ПЕРЕСЕЧЕНИЯ НА ВЕРХНЕМ КОНТУРЕ
C
DO 20 J=IGR, N-1
C
C      УЧАСТОК КОНТУРА,ГДЕ ЕСТЬ ТОЧКА X
C
IF(XTEK(I).LE.FR(1, J).AND.XTEK(I).GE.FR(1, J+1))GOTO 21
20 CONTINUE
21 CALL VIBKON(FR, J, C, T)
D WRITE(1,556) T
556 FORMAT(2X, 'FORMAT-556, SUB: ZUBKOR' /10X, ' T=', 2E12.4)
FTU(1, I)=T(1)
FTU(2, I)=T(2)
   I=I+1
   XTEK(I)=XTEK(I-1)+H
   GOTO 7
25 I=I-1
   RETURN
   END
SUBROUTINE ZUBIK(FTN, FTU, XTEK, I, YCT, SJX, SJY, SJXY, SZUB, H
#)
C
C      ПАРАМЕТРЫ ЗУБА.
C      ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C      FTN-НИЖНИЕ ТОЧКИ ЗУБА, ОСЬ Y
C      FTU-ВЕРХНИЕ ТОЧКИ ЗУБА, ОСЬ Y

```

```

C      XTEK—ТЕКУЩАЯ КООРДИНАТА, ОСЬ X
C      ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C      SJX, SJY—СУММЫ ОСЕВЫХ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ
C      SJXY—СУММА ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ
C      SZUB—ПЛОЩАДЬ ЗУБА
C
C      DIMENSION FTN(2, 40), FTU(2, 40), YCT(40), S(40),
C      *BJX(40), BJXY(40), BJY(40), XTEK(40)
C      DO 10 J=1, I
C
C      ВЫСОТА УЧАСТКА ЗУБА ПО ОСИ Y
C
C      BLUN=FTU(2, J)-FTN(2, J)
C
C      КООРДИНАТА Y ,ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ
C
C      YCT(J)=FTN(2, J)+BLUN/2.
C
C      ПЛОЩАДЬ УЧАСТКА
C
C      S(J)=BLUN*H
C
C      ОСЕВЫЕ МОМЕНТЫ ИНЕРЦИИ
C
C      BJX(J)=(YCT(J)*YCT(J))*S(J)
C      BJY(J)=(XTEK(J)*XTEK(J))*S(J)
C
C      ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ
C
C      BJXY(J)=XTEK(J)*YCT(J)*S(J)
10 CONTINUE
C      SZUB=0.
C      SJX=0.
C      SJY=0.
C      SJXY=0.
C      DO 20 J=1, I
C      SZUB=SZUB+S(J)
C      SJX=SJX+BJX(J)
C      SJY=SJY+BJY(J)
C      SJXY=SJXY+BJXY(J)
20 CONTINUE
D      WRITE(1, 9) SJX, SJY, SJXY
9      FORMAT(2X, 'FORMAT-9, SUB: ZUBIK' / 2X, ' SJX=' , 2X, E12.4,
C      *4X, ' SJY=' , 2X, E12.4, 4X, ' SJXY=' , 2X, E12.4)
C      RETURN
C      END
C      SUBROUTINE GMSESH(KOLZUB, SJX, SJY, SJXY, ALF0, SZUB, BJU, BJV
C      #, SS, SOJX,
C      *SOJY, SOJXY, ALF1)
C
C      ГЛАВНЫЕ МОМЕНТЫ ИНЕРЦИИ СЕЧЕНИЯ ФРЕЗЫ.
C      ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C      KOLZUB—КОЛИЧЕСТВО ЗУБЬЕВ ФРЕЗЫ
C      SJX, SJY—СУММЫ ОСЕВЫХ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ
C      SJXY—СУММА ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ
C      ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C      BJU, BJV—ГЛАВНЫЕ МОМЕНТЫ ИНЕРЦИИ СЕЧЕНИЯ ФРЕЗЫ
C      SS—ПЛОЩАДЬ СЕЧЕНИЯ ФРЕЗЫ
C      ALF0—УГОЛ ПОВОРОТА ГЛАВНЫХ ОСЕЙ ИНЕРЦИИ
C      SZUB—ПЛОЩАДЬ ЗУБА

```

```

C
D   WRITE(1,4)KOLZUB,SJX,SJY,SJXY
4  FORMAT(2X,'FORMAT-4,SUB:GMSESH'/2X,'KOLZUB=',I3,
   *4X,'SJX=',E12.4,3X,'SJY=',E12.4,3X,'SJXY=',E12.4)
   SS=0.
   SOJX=0.
   SOJY=0.
   SOJXY=0.
   CHALF=((360./KOLZUB)/180.)*3.141592
   DO 10 I=1,KOLZUB
   ALF=CHALF*(I-1)
   GALF=(ALF/3.141592)*180.
D   WRITE(1,5)KOLZUB,CHALF,GALF
5  FORMAT(2X,'FORMAT-5,SUB:GMSESH'/2X,'KOLZUB=',2X,I3,
   *4X,'CHALF=',2X,E12.4,4X,'GALF=',2X,E12.4)
   SOJX=SOJX+SJX*(COS(ALF)*COS(ALF))+SJY*(SIN(ALF)*SIN(ALF
#))-
   *SJXY*SIN(ALF*2.)
   SOJY=SOJY+SJY*(COS(ALF)*COS(ALF))+SJX*(SIN(ALF)*SIN(ALF
#))+
   *SJXY*SIN(ALF*2.)
   SOJXY=SOJXY+SJXY*COS(ALF*2.)-(SJY-SJX)*SIN(ALF*2.)
D   WRITE(1,6)SOJX,SOJY,SOJXY
6  FORMAT(2X,'FORMAT-6,SUB:GMSESH'/2X,'SOJX=',2X,E12.4,
   *4X,'SOJY=',2X,E12.4,4X,'SOJXY=',2X,E12.4)
10 CONTINUE

C
C   УГОЛ НАКЛОНА ПЛАВНЫХ ОСЕЙ
C
C   TALF=2.*SOJXY/(SOJY-SOJX)
C   ALF0=ATAN(TALF)/2.
C   ALF1=(ALF0/3.141592)*180.

C
C   ПЛАВНЫЕ МОМЕНТЫ ИНЕРЦИИ СЕЧЕНИЯ ФРЕЗЫ
C
C   BJX=SOJX*(COS(ALF0)*COS(ALF0))+SOJY*(SIN(ALF0)*
#*SIN(ALF0))-SOJXY*SIN(ALF0*2.)
C   BJY=SOJY*(COS(ALF0)*COS(ALF0))+SOJX*(SIN(ALF0)*
#*SIN(ALF0))+SOJXY*SIN(ALF0*2.)

C
C   ПЛОЩАДЬ СЕЧЕНИЯ ФРЕЗЫ
C
C   SS=SZUB*KOLZUB
C   RETURN
C   END
C   SUBROUTINE UIBKON (FR,J,C,T)

C
C   ВЫБОР УЧАСТКА КОНТУРА ЗУБА ФРЕЗЫ
C   ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C   FR-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СЕЧЕНИЯ ЗУБА ФРЕЗЫ.
C   C-КОЭФИЦИЕНТЫ УРАВНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРЯМОЙ.
C   ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C   T-ТОЧКИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ

C
C   DIMENSION R(3),FR(6,10),T(2),T1(2),T2(2),ALF(4),C(3),RX
#(2),RY(2)
C   IF(FR(6,J).EQ.0.)GO TO 10

C
C   КУБИЧЕСКАЯ ПАРАБОЛА

```



```

      ALF(1)=FR(3,J)
      ALF(2)=FR(4,J)
      ALF(3)=FR(5,J)
      ALF(4)=FR(6,J)
C     CALL PLNM (N,ALF,T)
D     WRITE(1,444)
444  FORMAT(2X,'FORMAT-444,SUB:VIBKON = НЕВЕРНЫЙ ПУТЬ ')
      GO TO 299
C
C     ОКРУЖНОСТЬ
C
16  IF(FR(3,J).EQ.9.)GO TO 46
      R(1)=FR(3,J)
      R(2)=FR(4,J)
      R(3)=FR(5,J)
      A=FR(2,J)-R(3)
      B=FR(2,J+1)-R(3)
      CALL POP(R,C,T,A,B)
D     WRITE(1,447)T
447  FORMAT(2X,'FORMAT-447,SUB:VIBKON=ОКРУЖНОСТЬ' /
      *4X,'T(1)=' ,2X,E12.4,4X,'T(2)=' ,2X,E12.4)
      GO TO 299
C
C     ПРЯМАЯ
C
46  T1(1)=FR(1,J)
      T1(2)=FR(2,J)
      T2(1)=FR(1,J+1)
      T2(2)=FR(2,J+1)
      CALL KOFFPR(T1,T2,R)
      CALL PERPR(R,C,T,K)
D     WRITE(1,449)R,C,T,K
449  FORMAT(2X,'FORMAT-449,SUB:VIBKON = ПРЯМАЯ ' /2X,'R=' ,2X,
      #3E12.4,
      *2X,'C=' ,2X,3E12.4,2X,'T=' ,2X,2E12.4,2X,'K=' ,2X,I2)
299  RETURN
      END

```

## SUBROUTINE MKENL

```

C
C
C           MKE - СТЕРЖНЕВАЯ ЗАДАЧА
C
      DIMENSION XNUC(30), FJ(12, 30), NBC(6), NFIX(6, 6),
      *          GM(100, 12), PR(100), C(6, 6), IMA(15)
      CALL FALIM(1, 'ВЫБОДА.')
      READ(2, 300) NUS, KLU, NJ
      WRITE(1, 400) NUS, KLU
D
300 FORMAT(3I2)
400 FORMAT(' *** СТЕРЖНЕВАЯ ЗАДАЧА MKE ***' /
      * ' ЧИСЛО УЗЛОВ', 10(' '), I2 /
      * ' РЕЖИМ РАБОТЫ', 10(' '), I2)
      READ(2, 301) (XNUC(I), I=1, NUS)
      WRITE(1, 401) (XNUC(I), I=1, NUS)
D
301 FORMAT(5F10.5)
401 FORMAT('  КООРДИНАТЫ УЗЛОВ МОДЕЛИ: ' / (5F10.4))
302 FORMAT(I2)
310 FORMAT(6I1)
303 FORMAT(I2)
      READ(2, 304) E, FG
      WRITE(1, 404) E, FG
D
304 FORMAT(2F10.1)
404 FORMAT('  УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ: ' /
      * ' МОДУЛЬ УПРУГОСТИ 1 РОДА', 7(' '), F10.1 /
      * ' МОДУЛЬ УПРУГОСТИ 2 РОДА', 7(' '), F10.1)
      NOMER=60.
      IF(KLU.EQ.3) NOMER=NUS-1
      READ(2, 305) ((FJ(I, J), I=1, NJ), J=1, NOMER)
      IF(KLU.EQ.3) GOTO 420
D
      WRITE(1, 405) ((FJ(I, J), I=1, NJ), J=1, NOMER)
305 FORMAT(12F10.3)
405 FORMAT('  ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ: ' / (2X, 12F10.3))
      GOTO 421
420 CONTINUE
D
      WRITE(1, 422) ((FJ(I, J), I=1, NJ), J=1, NOMER)
422 FORMAT('  ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ: ' / (2X, 12F10.3))
421 NDF=6
      NBD=12
      NEQ=NUS*NDF
800 CALL FORZAK(NUS, XNUC, NB, NBC, NFIX, C)
      CALL GLOBNL(E, FG, XNUC, FJ, KLU, NBD, NUS, NJ,
      *          NDF, 2, NB, NBC, NFIX, C, NEQ, GM)
C           ФОРМИРОВАНИЕ ПРАВОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ
705 CALL FORSIL(NUS, NEQ, XNUC, PR)
      TYPE 200
200 FORMAT('  FORSIL  END')
      CALL RSYSL(GM, PR, NEQ, NBD)
      TYPE 201
201 FORMAT('  RSYSL  END')
      WRITE(1, 7) (PR(I), I=1, NEQ)
7 FORMAT(// '  РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ : ' / (2X, 6E11.3
      #))
      CALL KORTOK(PR, NUS, NEQ, XNUC)
      TYPE 700
700 FORMAT('  БУДЕТЕ ВВОДИТЬ СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ? ' /
      * ' ЕСЛИ ДА, ТО ВВЕДИТЕ КОД 1  ', *)
      ACCEPT 701, KLUK
701 FORMAT(I1)
      IF(KLUK.NE.1) GOTO 705

```

```

TYPE 707
707 FORMAT(' БУДЕТЕ МЕНЯТЬ УСЛОВИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ? (1/0):')
ACCEPT 701,KLUK
IF(KLUK.EQ.1) GOTO 300
RETURN
END
SUBROUTINE GLOBNL(E,FG,XNUC,FJ,KLU,NBD,NUS,NJ,
*      NDF,NC,NB,NBC,NFIX,C,NEQ,GM)
C
C      ГЛОБАЛЬНАЯ МАТРИЦА ЖЕСТКОСТИ, ЕЕ МОДИФИКАЦИЯ
C
C      ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C
C      E      - МОДУЛЬ УПРУГОСТИ 1 РОДА
C      FG     - МОДУЛЬ УПРУГОСТИ 2 РОДА
C      XNUC   - КООРДИНАТЫ X УЗЛОВ
C      FJ     - ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ
C      KLU    - КЛЮЧ:
C              =1 - ОБР-КА ЛОПАТКИ ОТ ХВОСТА К ГОЛОВЕ
C              =2 -              ОТ ГОЛОВЫ К ХВОСТУ
C              =3 - РАСЧЕТ СТЕРЖНЯ
C      NBD   - ПОЛОВИНА ШИРИНЫ ЛЕНТЫ МАТРИЦЫ
C      NUS   - КОЛИЧЕСТВО УЗЛОВ
C      NDF   - ЧИСЛО СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ В УЗЛЕ
C      NC    - ЧИСЛО УЗЛОВ В ЭЛЕМЕНТЕ
C      NB    - ЧИСЛО УЗЛОВ, В КОТОРЫХ ИМЕЮТСЯ ГРАНИЧ. УСЛ.
C      NBC   - НОМЕРА УЗЛОВ, В КОТ. УКАЗАНЫ ГРАНИЧН. УСЛ.
C      NFIX  - УСЛОВИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ В ЭТИХ УЗЛАХ
C
C      ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C
C      GM     - МОДИФИЦИРОВАННАЯ ГМЖ
C
C      DIMENSION XNUC(NUS),FJ(NJ,NUS),NBC(6),NFIX(6,6),GM(NEQ,
*      #NBD),
*      GME(12,12),T(6,6),F(12),C(6,6)
D      CALL CLOSE(2)
D      CALL FALIM(2,'ДЛЯ ОТЛАДКИ.')
```

```
NE=NUS-1
```

```
C      ЗАЧИСЛКА МАССИВА ГМЖ
```

```
DO 5 N=1,NEQ
```

```
DO 5 M=1,NBD
```

```
5      GM(N,M)=0.
```

```
D      TYPE 500,((GM(I,J),J=1,NBD),I=1,NEQ)
```

```
500 FORMAT(6F10.2)
```

```
C      ЦИКЛ ПО ЧИСЛУ ЭЛЕМЕНТОВ
```

```
DO 400 ID=1,NE
```

```
D      WRITE(2,300)ID
```

```
TYPE 300, ID
```

```
300 FORMAT(' *** ЭЛЕМЕНТ *** ',I2)
```

```
M=NDF*(ID-1)+1
```

```
N=M+11
```

```
C      РАСЧЕТ МАТРИЦЫ ЖЕСТКОСТИ ЭЛЕМЕНТА
```

```
DO 444 I=1,NJ
```

```
444      F(I)=FJ(I, ID)
```

```
GA=F(5)
```

```
D      TYPE 501,(F(III),III=1,NJ),GA
```

```
501 FORMAT(6F12.3)
```

```
STOC=XNUC(ID+1)-XNUC(ID)
```

```
D      TYPE 502,STOC
```

```

582 FORMAT(F15.3)
238 CALL DFCOS(GA,T)
978 CALL NG125T(STOC,F,E,FG,GME)
D WRITE(2,222)((GME(IS,JS),JS=1,12),IS=1,12)
789 IF(F(5).EQ.0.)GOTO 77
CALL NGE126(GME,T)
77 CONTINUE
D WRITE(2,222)((GME(IS,JS),JS=1,12),IS=1,12)
222 FORMAT(' МЖЕ В ОБЩЕЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ' /12(2X,12E10.
#2/))
C ВКЛЮЧЕНИЕ МЖЕ ДАННОГО ЭЛЕМЕНТА В ГМЖ
K=0
DO 499 I=M,N
K=K+1
DO 499 J=1,NBD
KK=K+J-1
IF(KK.GT.12)GOTO 499
GM(I,J)=GM(I,J)+GME(K,KK)
499 CONTINUE
D WRITE(2,51)((GM(I,J),J=1,NBD),I=1,NEQ)
51 FORMAT(2X,12E9.1)
C УЧЕТ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ (МОДИФИКАЦИЯ ГМЖ)
DO 59 N=1,NB
I=NBC(N)
NROWS=(I-1)*NDF
C NROWS - НОМЕР ГЛОБАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, НА КОТОРОЕ
C БУДЕТ НАЛОЖЕНО ОГРАНИЧЕНИЕ
DO 49 N=1,NDF
NROWS=NROWS+1
IF(NFIX(N,M).EQ.1)GM(NROWS,1)=GM(NROWS,1)*C(N,M)
C GM(NROWS,1) - ДИАГОНАЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ГМЖ, РАСПОЛОЖЕНН
C #5M
C В СТРОКЕ NROWS. ОН МОДИФИЦИРУЕТСЯ СОГ
C #ЛАСНО
C ГР. УСЛ. ДОМНОЖЕНИЕМ НА БОЛЬШОЕ ЧИСЛО
49 CONTINUE
59 CONTINUE
D WRITE(2,52)((GM(I,J),J=1,NBD),I=1,NEQ)
52 FORMAT(1X,12E10.2)
RETURN
END
SUBROUTINE RSYSL(SF,PR,NEQ,NBD)
C
C РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЯ
C
C ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C
C SF - ПОЛОВИНА ШИРИНЫ ЛЕНТЫ ГМЖ
C PR - МАТРИЦА ПРАВОЙ ЧАСТИ
C NEQ - ЧИСЛО УРАВНЕНИЯ СИСТЕМЫ
C NBD - ПОЛОВИНА ШИРИНЫ ЛЕНТЫ
C
C ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C
C PR - РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЯ
C
C DIMENSION SF(180,12),PR(NEQ),SP1(NEQ,NBD)
C ПРЯМОЙ ХОД ПО ГАУССУ
DO 333 I=1,NEQ
DO 333 J=1,NBD

```

```

      SP(I,J)=SP1(I,J)
333 CONTINUE
D   WRITE(3,45)((SP(I,J),J=1,NBD),I=1,NEQ)
D   WRITE(3,46)
46  FORMAT(///)
33  DO 30 N=1,NEQ
      SP(N,1)=1./SP(N,1)
      IF(SP(N,1).LE.1.E-14)SP(N,1)=1.E-14
D   TYPE 61,SP(N,1)
61  FORMAT(2X,' SP=',E10.2)
      I=N
C     НАЧАЛО ЦИКЛА ПО СТОЛБЦАМ ГИЖ
      DO 29 L=2,NBD
          I=I+1
          IF(SP(N,L))24,29,24
24  C=SP(N,L)*SP(N,1)
          J=0
          DO 27 K=L,NBD
              J=J+1
              IF(I.GT.NEQ)GOTO 27
              IF(SP(N,K))25,27,26
25  SP(I,J)=SP(I,J)-C*SP(N,K)
              TYPE 62,I,J,SP(I,J)
62  FORMAT(2X,2I5,' SP=',E10.2)
27  CONTINUE
              IF(I.GT.NEQ)GOTO 49
              PR(I)=PR(I)-C*PR(N)
D   TYPE 63,I,PR(I)
63  FORMAT(5X,I5,' PR=',E10.2)
49  SP(N,L)=C
29  CONTINUE
          PR(N)=PR(N)*SP(N,1)
D   TYPE 63,N,PR(N)
30  CONTINUE
D   WRITE(3,45)((SP(I,J),J=1,NBD),I=1,NEQ)
45  FORMAT(2X,12E10.2)
C     ОБРАТНЫЙ ХОД
      N=NEQ-1
35  L=N
      DO 40 K=2,NBD
          L=L+1
          IF(L.GE.NEQ)GOTO 40
          IF(SP(N,K))37,40,37
37  PR(N)=PR(N)-SP(N,K)*PR(L)
D   TYPE 64,N,PR(N)
64  FORMAT(10X,I5,E10.2)
40  CONTINUE
      N=N-1
      IF(N.NE.0)GOTO 35
      RETURN
      END
      SUBROUTINE DFCOS(GA,T)
          МАТРИЦА НАПРАВЛЯЮЩИХ КОСИНУСОВ
C
C     ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C
C     GA - УГОЛ НАКЛОНА ГЛАВНЫХ ОСЕЙ ИНЕРЦИИ
C
C     ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:

```

Т-ОДНОМЕРНЫЙ МАССЫВ, МАТРИЦА НАПРАВЛЯЮЩИХ  
КОСИНУСОВ

```

DIMENSION T(6,6)
DATA PI/3.1415926/
DO 55 I=1,6

DO 55 J=1,6
55 T(I,J)=0.
Z=PI*180.
G=GA*Z
C=COS(G)
S=SIN(G)
T(1,1)=C
T(1,2)=S
T(2,1)=-S
T(2,2)=C
T(3,3)=C
T(3,4)=S
T(4,3)=-S
T(4,4)=C
T(5,5)=1.
T(6,6)=1.
RETURN
END
SUBROUTINE MG12ST(A,F,E,G,GME)

```

МАТРИЦА ЖЕСТКОСТИ ТОНКОСТЕННОГО  
СТЕРЖНЕВОГО ЭЛЕМЕНТА

```

DIMENSION B(12,12),C(12,12),F(12),GME(12,12),
* R(12,12)
A2=A*A
A3=A*A*A
A4=A*A*A*A
A5=A*A*A*A*A
DO 2 I=1,12
DO 2 J=1,12
2 B(I,J)=0.
B(1,1)=1.
B(2,2)=1.
B(3,3)=-1.
B(4,4)=1.
B(5,5)=1.
B(6,6)=1.
B(7,1)=2.*A3
B(7,4)=1.*A2
B(7,7)=-2.*A3
B(7,10)=1.*A2
B(8,2)=2.*A3
B(8,3)=-1.*A2
B(8,8)=-2.*A3
B(8,9)=-1.*A2
B(9,2)=-3.*A2
B(9,3)=2.*A
B(9,8)=3.*A2
B(9,9)=1.*A
B(10,1)=-3.*A2
B(10,4)=-2.*A
B(10,7)=3.*A2

```

```

B(10,10)=-1.<A
B(11,5)=-3.<A2
B(11,6)=-2.<A
B(11,11)=3.<A2
B(11,12)=-1.<A
B(12,5)=2.<A3
B(12,6)=1.<A2
B(12,11)=-2.<A3
B(12,12)=1.<A2
D
WRITE(3,6)((B(I,J),J=1,12),I=1,12)
5 FORMAT(' МАТРИЦА B' /12(2X,12E10.2)<)
D1=E*F(2)
D2=E*F(3)
D3=G*F(4)
D4=E*F(5)
D5=F(12)*E*F(8)
D6=F(12)*E*F(11)
D7=F(12)*E*F(7)
D8=E*F(9)
D9=E*F(10)
DO 5 I=1,12
DO 5 J=1,12
5 C(I,J)=0.
C(6,6)=D3*A
C(7,7)=D2*A3*12.
C(8,8)=D1*A3*12.
C(9,9)=4.*D1*A
C(10,10)=4.*D2*A
C(11,11)=4./3.*D3*A3+4.*D6*A2+4.*D4*A
C(12,12)=9./5.*D3*A5+9.*D6*A4+12.*D4*A3
C(5,7)=-3.*D5*A2
C(5,8)=-3.*D7*A2
C(5,9)=-2.*D7*A
C(5,10)=-2.*D5*A
C(5,11)=D3*A2+D6*A*2.
C(5,12)=D3*A3+3.*D6*A2
C(7,10)=5.*D2*A2
C(7,11)=-4.*D5*A3-6.*D8*A2
C(7,12)=-9./2.*D5*A4-12.*D8*A3
C(8,9)=5.*D1*A2
C(8,11)=-4.*D7*A3-6.*D9*A2
C(8,12)=-9./2.*D7*A4-12.*D9*A3
C(9,11)=-2.*D7*A2-4.*D9*A
C(9,12)=-2.*D7*A3-6.*D9*A2
C(10,11)=-2.*D5*A2-4.*D8*A
C(10,12)=-2.*D5*A3-6.*D8*A2
C(11,12)=3./2.*D3*A4+6.*D6*A3+6.*D4*A2
DO 8 I=1,12
DO 8 J=1,12
C(J,I)=C(I,J)
8 CONTINUE
CALL TRMAT(B,GME,12,12)
CALL PRMAT(GME,C,R,12,12,12)
CALL PRMAT(R,B,GME,12,12,12)
RETURN
END
SUBROUTINE MGE12G(GME,T)
C
C      ПЕРЕВОД ММЕ ИЗ МЕСТНОЙ В ГЛОБ. СИСТ. КООРД
C

```

```

C      DIMENSION GME(12,12),T(6,6),A(12,12),TCOS(12,12),B(12,1
#2)
      DO 1 I=1,12
          DO 1 J=1,12
1          TCOS(I,J)=0.
          M=1
          N=6
          K=0
C      ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ НАПРАВЛЯЮЩИХ КОСИНУСОВ 12*12
4      DO 2 J=M,N
          DO 2 I=M,N
2          TCOS(I,J)=TCOS(I,J)+T(I-K,J-K)
          IF(N.EQ.12)GOTO 3
          M=M+6
          N=N+6
          K=K+6
          GOTO 4
3      CONTINUE
D      WRITE(2,10)((TCOS(I,J),J=1,12),I=1,12)
10     FORMAT(' МАТРИЦА НАПРАВЛЯЮЩИХ КОСИНУСОВ' / (12(2X,12E10.2
#>)>))
      CALL TRMAT(TCOS,B,12,12)
      CALL PRZMAT(B,GME,A,12,12,12)
C      УМНОЖЕНИЕ ПОЛУЧЕННОЙ МАТРИЦЫ НА МАТРИЦУ
C      НАПРАВЛЯЮЩИХ КОСИНУСОВ
      CALL PRZMAT(A,TCOS,GME,12,12,12)
      RETURN
      END

```



```

C
C
C          ПРОГРАММА MKE
C
C          CALL ASSIGN(2, 'MUL.FIL')
C          CALL ASSIGN(4, 'LOF.FIL')
C          CALL MKEUS
15      STOP
C          END
C
C          ПРИБЛИЖЕНИЕ МАТРИЦ С И А
C          К НОРМАЛЬНЫМ КООРДИНАТАМ
C
C          DIMENSION X(42,42),U(42,42),Y(42,42),G(42,42)
C          CALL ASSIGN(2, 'MUL.FIL')
C          OPEN(UNIT=3, ACCESS='DIRECT', ASSOCIATEVARIABLE=I3,
*          BLOCKSIZE=4, DISPOSE='KEEP', NAME='STRES.FIL',
*          TYPE='OLD', RECORDSIZE=1764)
C          READ(2,1)NUS
1      FORMAT(I2)
C          I3=4
C          READ(3' I3)((U(I, J), I=1, NUS), J=1, NUS)
C          CALL TRMAT(U, X, NUS, NUS)
C          I3=1
C          READ(3' I3)((G(I, J), I=1, NUS), J=1, NUS)
C          CALL PRZMAT(S, G, Y, NUS, NUS, NUS)
C          CALL PRZMAT(Y, U, X, NUS, NUS, NUS)
C          I3=1
C          WRITE(3' I3)((X(I, J), I=1, NUS), J=1, NUS)
C          CALL TRMAT(U, X, NUS, NUS)
C          I3=2
C          READ(3' I3)((G(I, J), I=1, NUS), J=1, NUS)
C          CALL PRZMAT(X, G, Y, NUS, NUS, NUS)
C          CALL PRZMAT(Y, U, X, NUS, NUS, NUS)
C          I3=2
C          WRITE(3' I3)((X(I, J), I=1, NUS), J=1, NUS)
C          STOP
C          END
C
C          СОБСТВЕННЫЕ ФОРМЫ И СОБСТВЕННЫЕ
C          ЧИСЛА (SOBFOR)
C
C          DIMENSION A(1764),C(1764),OM(42),X(42,42),U(1764)
C          CALL ASSIGN(2, 'MUL.FIL')
C          CALL ASSIGN(3, 'STRES.FIL')
C          DEFINE FILE 3(4, 3528, U, I3)
C          READ(2,1)NUS
1      FORMAT(I2)
C          NEG=NUS*NUS
C          READ(3' 1)(C(K), K=1, NEG)
C          READ(3' 2)(A(K), K=1, NEG)
C          CALL NRDOT(NUS, C, A, OM, U)
C          WRITE(3' 3)(OM(K), K=1, NUS)
C          CALL VEKMAT(C, NUS, NEG, X)
C          WRITE(3' 1)((X(I, J), I=1, NUS), J=1, NUS)
C          CALL VEKMAT(A, NUS, NEG, X)
C          WRITE(3' 2)((X(I, J), I=1, NUS), J=1, NUS)
C          CALL VEKMAT(U, NUS, NEG, X)
C          WRITE(3' 4)((X(I, J), I=1, NUS), J=1, NUS)
C          STOP
C          END

```

C  
C  
C

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛЕНТОЧНЫХ МАТРИЦ (PREMAT)

```

DIMENSION GM(42,42),GM1(1764)
CALL ASSIGN(2,'MJL.FIL')
CALL ASSIGN(3,'STRES.FIL')
DEFINE FILE 3(4,3528,U,I3)
READ(2,1)NUS
1 FORMAT(I2)
  NEG=NUS*NUS
  DO 2 K=1,2
    READ(3'K)((GM(I,J),J=1,12),I=1,NEG)
    CALL LENKU(GM,NUS,12,NEG,GM1)
    WRITE(3'K')(GM1(I),I=1,NEG)
2 CONTINUE
  STOP
  END

```

C  
C  
C

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВЕКТОРА В МАТРИЦУ

```

SUBROUTINE VEKMAT(A,N,NN,B)
DIMENSION A(NN),B(N,N)
K=0
DO 1 I=1,N
DO 1 J=1,N
K=K+1
B(J,I)=A(K)
1 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE LENKU(A,N,LEN,NN,C)
DIMENSION A(42,12),B(42,42),C(1764)
DO 1 I=1,N
DO 1 J=1,N
B(I,J)=0
1 CONTINUE
K=-1
DO 2 I=1,N
K=K+1
DO 2 J=1,LEN
JJ=K+J
IF(JJ.GT.N)GOTO 2
B(I,JJ)=B(I,JJ)+A(I,J)
2 CONTINUE
DO 3 I=1,N
DO 3 J=1,N
B(J,I)=B(I,J)
3 CONTINUE
K=0
DO 4 J=1,N
DO 4 I=1,N
K=K+1
C(K)=B(I,J)
4 CONTINUE
RETURN
END

```

C  
C  
C  
CДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ  
ДВУХЧАСТОТНОЙ МОДЕЛИ

```

COMMON R, NH1, FM0, NZ, FK5, P9, A0, T, S0, X1, Y1,
*      A00, C0, D0, R00, A1, D1, FL1, E1, G10, U1, U2, US, FLP
CALL FALIM(2, 'MIWODA.')
TYPE 1
WRITE(2,1)
1  *  FORMAT(' ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ' /
*    ДВУХЧАСТОТНОЙ МОДЕЛИ' /)
NN1=1
NN2=22
502 DO 500 NN=NN1,NN2
915 IF(NN.EQ.1) TYPE 2
2  FORMAT(' РАДИУС ФРЕЗЫ (ММ) '*)
IF(NN.EQ.1) ACCEPT 3,R
3  FORMAT(F10.5)
IF(NN.EQ.1) WRITE(2,4)R
4  FORMAT(' РАДИУС ФРЕЗЫ (ММ) ',F10.5)
IF(NN.EQ.2) TYPE 65
65  FORMAT(' ШАГ ДЛЯ ПЕЧАТИ (ГРАД) '*)
IF(NN.EQ.2) ACCEPT 9,NH1
IF(NN.EQ.2) WRITE(2,66)NH1
66  FORMAT(' ШАГ ДЛЯ ПЕЧАТИ (ГРАД) ',I3)
IF(NN.EQ.3) TYPE 5
5  FORMAT(' УГОЛ НАКЛОНА ЗУБЬЕВ ФРЕЗЫ (ГРАД) '*)
IF(NN.EQ.3) ACCEPT 3,FM0
IF(NN.EQ.3) WRITE(2,6)FM0
6  FORMAT(' УГОЛ НАКЛОНА ЗУБЬЕВ ФРЕЗЫ (ГРАД) ',F10.5)
IF(NN.EQ.4) TYPE 7
7  FORMAT(' ЧИСЛО ЗУБЬЕВ (-) '*)
IF(NN.EQ.4) ACCEPT 9,NZ
9  FORMAT(I3)
IF(NN.EQ.4) WRITE(2,8)NZ
8  FORMAT(' ЧИСЛО ЗУБЬЕВ (-) ',I3)
IF(NN.EQ.5) TYPE 10
10  FORMAT(' СООТНОШЕНИЕ PR:P (-) '*)
IF(NN.EQ.5) ACCEPT 3,FK5
IF(NN.EQ.5) WRITE(2,11)FK5
11  FORMAT(' СООТНОШЕНИЕ PR:P (-) ',F10.5)
IF(NN.EQ.6) TYPE 12
12  FORMAT(' УДЕЛЬНАЯ СИЛА РЕЗАНИЯ (Н/ММ) '*)
IF(NN.EQ.6) ACCEPT 3,P9
IF(NN.EQ.6) WRITE(2,14)P9
14  FORMAT(' УДЕЛЬНАЯ СИЛА РЕЗАНИЯ (Н/ММ) ',F10.5)
IF(NN.EQ.7) TYPE 15
15  FORMAT(' УГОЛ НАКЛОНА ФРЕЗЫ (ГРАД) '*)
IF(NN.EQ.7) ACCEPT 3,A0
IF(NN.EQ.7) WRITE(2,16)A0
16  FORMAT(' УГОЛ НАКЛОНА ФРЕЗЫ (ГРАД) ',F10.5)
IF(NN.EQ.8) TYPE 17
17  FORMAT(' ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ (ММ) '*)
IF(NN.EQ.8) ACCEPT 3,T
IF(NN.EQ.8) WRITE(2,18)T
18  FORMAT(' ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ (ММ) ',F10.5)
IF(NN.EQ.9) TYPE 19
19  FORMAT(' РАБОЧАЯ ПОДАЧА (ММ/ЗУБ) '*)
IF(NN.EQ.9) ACCEPT 3,S0
IF(NN.EQ.9) WRITE(2,20)S0
20  FORMAT(' РАБОЧАЯ ПОДАЧА (ММ/ЗУБ) ',F10.5)
IF(NN.EQ.10) TYPE 21
21  FORMAT(' КООРДИНАТЫ X, Y ФОРМОБЕЗ. ТОЧКИ (ММ) '*)
IF(NN.EQ.10) ACCEPT 22,X1,Y1

```

```

22   FORMAT(2F10.5)
    IF(NN.EQ.10) WRITE(2,23)X1,Y1
23   FORMAT(' КООРДИНАТЫ X , Y #ОПМОБЕР. ТОЧКИ (MM) '
    *,2F10.5)
1265 IF(NN.GE.11.AND.NN.LE.14) TYPE 34
34   FORMAT('      ОБРАЩЕУ: ')
    IF(NN.EQ.11) TYPE 402
402  FORMAT(' ДЛИНА (MM) '*)
    IF(NN.EQ.11) ACCEPT 3,A99
    IF(NN.EQ.11) WRITE(2,34)
    IF(NN.EQ.11) WRITE(2,402)
    IF(NN.EQ.11) WRITE(2,3)A99
1266 IF(NN.EQ.12) TYPE 35
35   FORMAT(' ШИРИНА (MM) '*)
    IF(NN.EQ.12) ACCEPT 3,C9
    IF(NN.EQ.12) WRITE(2,34)
    IF(NN.EQ.12) WRITE(2,35)
    IF(NN.EQ.12) WRITE(2,3)C9
1269 IF(NN.EQ.13) TYPE 35
36   FORMAT(' ВЫСОТА (MM) '*)
    IF(NN.EQ.13) ACCEPT 3,D9
    IF(NN.EQ.13) WRITE(2,34)
    IF(NN.EQ.13) WRITE(2,36)
    IF(NN.EQ.13) WRITE(2,3)D9
1270 IF(NN.EQ.14) TYPE 37
37   FORMAT(' УДЕЛЬНЫЙ ВЕС (*1.E-6 КГ/ММ**3) '*)
    IF(NN.EQ.14) ACCEPT 3,R9
    IF(NN.EQ.14) WRITE(2,34)
    IF(NN.EQ.14) WRITE(2,37)
    IF(NN.EQ.14) WRITE(2,3)R9
1275 IF(NN.GE.15.AND.NN.LE.20) TYPE 39
39   FORMAT('      УПРУГАЯ ЭЛЕМЕНТ: ')
    IF(NN.EQ.15) TYPE 403
403  FORMAT(' ШИРИНА (MM) '*)
    IF(NN.EQ.15) ACCEPT 3,A1
    IF(NN.GE.15.AND.NN.LE.20) WRITE(2,39)
    IF(NN.EQ.15) WRITE(2,403)
    IF(NN.EQ.15) WRITE(2,3)A1
1278 IF(NN.EQ.16) TYPE 40
40   FORMAT(' ВЫСОТА (MM) '*)
    IF(NN.EQ.16) ACCEPT 3,D1
    IF(NN.EQ.16) WRITE(2,40)
    IF(NN.EQ.16) WRITE(2,3)D1
1279 IF(NN.EQ.17) TYPE 41
41   FORMAT(' БИЛЕТ (MM) '*)
    IF(NN.EQ.17) ACCEPT 3,FL1
    IF(NN.EQ.17) WRITE(2,41)
    IF(NN.EQ.17) WRITE(2,3)FL1
1280 IF(NN.EQ.18) TYPE 42
42   FORMAT(' МОДУЛЬ ШИГА (Н/ММ**2) '*)
    IF(NN.EQ.18) ACCEPT 43,E1
    IF(NN.EQ.18) WRITE(2,42)
    IF(NN.EQ.18) WRITE(2,43)E1
43   FORMAT(F10.1)
1281 IF(NN.EQ.19) TYPE 44
44   FORMAT(' МОДУЛЬ СДВИГА (Н/ММ**2) '*)
    IF(NN.EQ.19) ACCEPT 43,G10
    IF(NN.EQ.19) WRITE(2,44)
    IF(NN.EQ.19) WRITE(2,43)G10
1282 IF(NN.EQ.20) TYPE 45

```

```

45  FORMAT(' ЛОГОТИФМЫЧЕСКИЕ ДЕКРЕМЕНТЫ 1, 2 (-) ')
    IF(NN.EQ.20) ACCEPT 46,U1,U2
    IF(NN.EQ.20) WRITE(2,45)
    IF(NN.EQ.20) WRITE(2,45)U1,U2
46  FORMAT(2F10,4)
    IF(NN.EQ.21) TYPE 51
51  FORMAT(' СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ (М/МИН) ')
    IF(NN.EQ.21) ACCEPT 3,US
    IF(NN.EQ.21) WRITE(2,51)
    IF(NN.EQ.21) WRITE(2,3)US
    IF(NN.EQ.22) TYPE 52
52  FORMAT(' ПУТЬ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ (ММ) ')
    IF(NN.EQ.22) ACCEPT 3,FLP
    IF(NN.EQ.22) WRITE(2,52)
    IF(NN.EQ.22) WRITE(2,3)FLP
500  CONTINUE
    R00=R0*1.E-6
507  TYPE 504
504  FORMAT(' БУДЕТЕ ВНОСИТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ? (1/0) ')
    ACCEPT 505,KLU
505  FORMAT(I2)
    IF(KLU.NE.1) GOTO 506
    CALL USL(NN)
    IF(NN.EQ.0) GOTO 501
    NN1=NN
    NN2=NN
    GOTO 502
506  CALL DRASS
    TYPE 599
599  FORMAT(' БУДЕТЕ ПРОДОЛЖАТЬ РАСЧЕТ ? (1/0) ')
    ACCEPT 505,KLU
    IF(KLU.EQ.1) GOTO 507
501  STOP
    END
    SUBROUTINE DRASS

```

C  
O  
O  
D

## D - РАЗМЕРЫ

```

    DIMENSION VAR(4,4),IU(2),UMIN(2),UMAX(2),H(2),
    *          IT(2),KUST(31,51),FU(31),FG(11)
    LOGICAL*1 KUST
    COMMON R,NN1,F00,NZ,FK5,F9,A0,T,50,X1,Y1,
    *       A00,C0,D0,R00,A11,D1,FL1,E1,G10,U1,U2,US,FLP
    COMMON/PAR/A1,A2,FK1,FK2,W1,W2,O1,O2,C1,C2
    COMMON/US/KU,KG,IU,VAR,IT,FU,FG,H,KUST
    DATA VAR/'УГОЛ',' ПО',' ЛОЖЕ',' НИЯ ',
    *       'СКОР',' ОСТЬ',' РЕЗ',' АНИЯ ',
    *       'РАБО',' ЧАЯ ',' ПОД',' АНА ',
    *       'ПЛУБ',' ИНА ',' РЕЗА',' НИЯ '
    TYPE 101
101  FORMAT(' РАЗМЕР ПОЛЯ ГРАФИКА '
    *' ПО ВЕРТИКАЛИ , ПО ГОРИЗОНТАЛИ (МАХ: 31,51) ')
    ACCEPT 102,IT
102  FORMAT(2I3)
    TYPE 1
1    FORMAT(' ВВЕДИТЕ ЧЕРЕЗ ЗАПЯТУЮ '
    *' ДВА ПАРАМЕТРА D-РАЗМЕРЕНИЯ ')
    DO 2 I=1,4
    TYPE 3,I,(VAR(J,I),J=1,4)
3    FORMAT(2X,I2,' - ',4A4)

```

```

2   CONTINUE
   TYPE 4
4   FORMAT(' I1,I2='*)
   ACCEPT 5,(IU(I),I=1,2)
5   FORMAT(2I3)
   TYPE 5
6   FORMAT(' ПРЕДЕЛЫ ВАРИИРОВАННЯ')
   DO 10 I=1,2
15  TYPE 7,(VAR(J,IU(I)),J=1,4)
7   FORMAT(2X,' ПАРАМЕТР ',4A4)
   * МИНИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ '*'
   ACCEPT 8,UMIN(I)
8   FORMAT(F10.4)
   TYPE 9
9   FORMAT(' МАКСИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ '*' )
   ACCEPT 9,UMAX(I)
   TYPE 987,UMIN(I),UMAX(I)
987 FORMAT(' UMIN,UMAX=',2E12.4)
   G=UMAX(I)-UMIN(I)
D   TYPE 986,G
986 FORMAT(' G=',E12.4)
   IF(G.GE.0.) GOTO 14
   TYPE 15
15  FORMAT(' ИСПРАВЬТЕ ВВОД')
   GOTO 15
14  H(I)=G/IT(I)
19  CONTINUE
D   TYPE 985,H
985 FORMAT(' H=',2E12.4)
   KU=IT(I)

   KG=1
   FU(1)=UMIN(1)
   FG(KG)=UMIN(2)
   DO 11 I=1,IT(1)
   TYPE 999,I
999 FORMAT(' *** СЕЧЕНИЕ ',I2,' ***')
   G1=UMIN(1)+H(1)*(I-1)
D   TYPE 984,G1
984 FORMAT(' UMIN 1=',2E12.4)
   FU(I)=G1
17  DO 11 J=1,IT(2)
   G2=UMIN(2)+H(2)*(J-1)
D   TYPE 981,G2
981 FORMAT(' UMIN 2=',E12.4)
   KUST(I,J)=' '
   IF(J.EQ.11.AND.I.EQ.1) GOTO 195
   IF(J.EQ.21.AND.I.EQ.1) GOTO 195
   IF(J.EQ.31.AND.I.EQ.1) GOTO 195
   IF(J.EQ.41.AND.I.EQ.1) GOTO 195
   IF(J.EQ.51.AND.I.EQ.1) GOTO 195
   GOTO 19
195 KG=KG+1
   FG(KG)=G2
19  IF(IU(1).EQ.1) AG=G1
   IF(IU(2).EQ.1) AG=G2
   IF(IU(1).EQ.3) U3=G1
   IF(IU(2).EQ.3) U3=G2
   IF(IU(1).EQ.5) G3=G1
   IF(IU(2).EQ.5) G3=G2
   IF(IU(1).EQ.4) T=G1

```

```

      IF(IU(2).EQ.4) T=62
      ID=I
      JD=J
      CALL PRAS(ID,JD)
D
      TYPE 449
449      FORMAT(' PRAS END')
500      FORMAT('/' PARAMETRY BAYBYPOBANIYA: '/2X,
*      4A4, ' - ',4A4)
501      FORMAT(' 1 - MIN=',F10.5,' MAX=',F10.5/
*      ' 2 - MIN=',F10.5,' MAX=',F10.5/)
      CALL PRUST(IUST)
      IF(IUST.EQ.1) KUST(I,J)='*'
      IF(IUST.EQ.2) KUST(I,J)='*'
      IF(IUST.EQ.3) KUST(I,J)='*'
D 11      CONTINUE
D
D 60      TYPE 80,KU,(FU(I),I=1,KU)
60      FORMAT(2X,I3,10E12.4)
D
D      TYPE 80,KG,(FG(I),I=1,KG)
D
D 81      TYPE 81,IT
81      FORMAT(5I5)
D
D 83      DO 83 I=1,IT(1)
D
D      TYPE 82,(KUST(I,J),J=1,IT(2))
D 82      FORMAT(1X,70A1)
D 83      CONTINUE
      WRITE(2,500)((VAR(I,IU(J)),I=1,4),J=1,2)
      TYPE 500,((VAR(I,IU(J)),I=1,4),J=1,2)
      WRITE(2,501)(UMIN(I),UMAX(I),I=1,2)
      TYPE 501,(UMIN(I),UMAX(I),I=1,2)
      CALL BRUST
      O01=SQRT(O1)/(2.*3.1415926)
      O02=SQRT(O2)/(2.*3.1415926)
      WRITE(2,71)O1,O2,O01,O02,W1,W2,FK1,FK2,A1,A2
D 71      FORMAT(' ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ' /
*      КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....',2E12.4/
*      СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....',2E12.4/
*      ПАРАМЕТРЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ.....',2E12.4/
*      КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ F.....',2E12.4/
*      КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....',2E12.4)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE USLUST(US,FLP,FN,BET,AH,OM2,I)
C
C      ПРОВЕРКА УСЛОВИЯ
C
      FTR=FLP/(US*16.7)
      FL=2.*FN*(FTR*FTR*OM2+1)
      FP=FTR*AH*BET
      I=0
      IF(FL.GE.FP)I=1
D
D 1      TYPE 1,FL,FP,I,US,FLP,FN,BET,AH,OM2
1      FORMAT(' FL=',E12.4,' FP=',E12.4,' I1=',I5/2X,6E
#12.4)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE PRAS(ID,JD)
C
C      ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ
C
      DIMENSION A(100),B(100),P(5,100),G(5),G1(5),
*      G2(5),NU1(5),NU2(5)

```

```

COMMON R, NH1, FM00, NZ, FK5, P9, A000, T, S0, X1, Y1,
      A00, C0, D0, R0, A11, D11, FL1, E1, G10, U1, U2
COMMON PAR A1, A2, FK1, FK2, W1, W2, O1, O2, C1, C2
1020 Z1=3.1415926/180.
1025 H=Z1
      P0=0.
      FM0=FM00*Z1
1027 FM0=SIN(FM0)/COS(FM0)
1030 I=0
      A0=A000*Z1
1032 S0=SIN(A0)
      C0=COS(A0)
      NG=-1
1034 FN1=SIN(P0)
      FN2=COS(P0)
      NG=NG+1
1035 A(I)=S0*FN1
1040 B(I)=(R*S0*(FN1-1)+T)/S0
1045 IF(B(I).GT.0.) GOTO 1070
      A(I)=0.
      B(I)=0.
1050 DO 25 N=1,5
1051 P(N,I)=0.
25 CONTINUE
1055 GOTO 1090
1070 P(1,I)=P0*A(I)*B(I)
1075 P(2,I)=P(1,I)*FK5
1080 P(3,I)=0.25*P(1,I)*FM0
1081 Q1=P(2,I)*FN1+P(1,I)*FN2
      Q2=P(3,I)*S0
1082 P(4,I)=-Q1*S0-Q2
      Q3=P(3,I)*C0
1083 P(5,I)=-Q1*C0+Q3
      P(6,I)=P(5,I)*X1-P(4,I)*Y1
      IF(NG.LT.NH1) GOTO 1090
      NG=0
1090 I=I+1
      P0=P0+H
1095 IF(I.LE.180) GOTO 1034
1098 K=360/NZ
1100 DO 26 N=1,5
1105 G1(N)=0.
1105 G2(N)=1.E10
1110 NG=-1
1115 DO 27 I=0,K
1115 NG=NG+1
1117 G(N)=0.
1120 DO 28 NU=1,NZ
1125 L=I+K*(NU-1)
1130 IF(L.LE.180) GOTO 1145
1135 IF(L.LT.360) GOTO 28
1140 IF(L.GE.360) L=L-360
1145 G(N)=G(N)+P(N,L)
28 CONTINUE
1151 IF(NG.LT.NH1) GOTO 1154
D1152 TYPE 29,N,I,G(N)
29 FORMAT(' N, I, G(N) =',2I5,E12.4)
1154 IF(NG.EQ.NH1) NG=0
1155 IF(G1(N).GE.ABS(G(N))) GOTO 1161
1155 G1(N)=ABS(G(N))

```



```

      NU1(N)=I
1161  IF(G2(N).LE.ABS(G(N))) GOTO 27.
1162  G2(N)=ABS(G(N))
      NU2(N)=I
      CONTINUE
D1170  TYPE 30,N,NU1(N),G1(N),G2(N)
      30  FORMAT(' ОКОНЧАТЕЛЬНО N,U,G1,G2 ',2I5,2E12.4)
      26  CONTINUE
1175  O9=ATAN(Y1/X1)
      O9=O9-A0
1177  O7=SIN(O9)
      O8=COS(O9)
      D1=SQRT(X1*X1+Y1*Y1)
1178  M=5
      FK1=0.
1179  FK2=0.
      A1=0.
      A2=0.
1180  DO 31 NU=1,NZ
1185  L=NU1(M)+K*(NU-1)
1190  IF(L.LE.180) GOTO 1205
1195  IF(L.LT.360) GOTO 31
1200  L=L-360
1205  P0=L*Z1
      IF(B(L).EQ.0.) GOTO 31
      FN1=SIN(P0)
      FN2=COS(P0)
1210  FK3=FK5*FN1+FN2
1212  IF(M.EQ.6) GOTO 1221
1213  A1=A1+A(L)*S9+B(L)*S8*FN1
1214  A2=A2+A(L)*D1*O8-B(L)*O7*FN1*D1
1215  FK1=FK1+(-0.28*FM0*S9+FK3*S8)
1217  IF(M.EQ.5) GOTO 31
1221  FK2=FK2+FK1*X1-(0.28*FM0*S8+FK3*S9)*Y1
      31  CONTINUE
1230  IF(M.EQ.6) GOTO 1244
1235  M=5
1240  GOTO 1180
1244  KKK=NU1(5)
      IF(G1(1).EQ.0.) GOTO 711
      FK1=ABS(G1(5)-G1(1))
      FK2=ABS(G1(5)-G1(1))
      GOTO 712
711  FK1=0.
      FK2=0.
712  CONTINUE
D1245  TYPE 32,FK1,FK2
      32  FORMAT(' FK1=',E12.4,' FK2=',E12.4)
      A1=ABS(A1)
      A2=ABS(A2)
D1246  TYPE 33,A1,A2
      33  FORMAT(' A1=',E12.4,' A2=',E12.4)
D1266  TYPE 48
      48  FORMAT(' ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ')
1310  FI1=A11*D11**3-12.
1315  FI2=0.3*A11*D11**3
D1317  TYPE 49,FI1,FI2
      49  FORMAT(' FI1=',E12.4,' FI2=',E12.4)
1325  C1=3.*E1*FI1/FL1**3
1330  C2=610*FI2/FL1

```

```

D1335 TYPE 50,C1,C2
50 FORMAT(' C1=',E12.4,' C2=',E12.4)
1336 FM1=A00*D0*C0*R0
1337 FM2=FM1*(A00*A00+D0*D0)/12.
D1338 TYPE 51,FM1,FM2
51 FORMAT(' FM1=',E12.4,' FM2=',E12.4)
1340 P1=2.*3.1415926
1375 Q1=C1*1000./FM1
Q1=SQRT(Q1)/P1
1380 Q2=C2*1000./FM2
Q2=SQRT(Q2)/P1
D1385 TYPE 54,Q1,Q2
54 FORMAT(' QM1=',E12.4,' QM2=',E12.4)
W1=Q1*C1/(2.*P1*Q1*FM1)*0.001
W2=Q2*C2/(2.*P1*Q2*FM2)
D 777 TYPE 777,W1,W2
777 FORMAT(' W1,W2=',2E12.4)
RETURN
END
SUBROUTINE PRUST(IUST)
C
C УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОСТИ
C
COMMON R,NH1,FM0,NZ,FK5,P9,A0,T,S0,X1,Y1,
* A00,C0,D0,R00,A11,D1,FL1,E1,G10,U1,U2,US,FLP
COMMON PAR/A1,A2,FK1,FK2,W1,W2,Q1,Q2
IUST=0
D 2 TYPE 2,IUST
2 FORMAT(' IUST=',I3)
CALL USLUST(US,FLP,W1,A1,FK1,Q1,I1)
CALL USLUST(US,FLP,W2,A2,FK2,Q2,I2)
IF(I1.EQ.0.AND.I2.EQ.1)IUST=1
IF(I1.EQ.1.AND.I2.EQ.0)IUST=2
IF(I1.EQ.0.AND.I2.EQ.0)IUST=3
D 4 TYPE 4,IUST
4 FORMAT(' IUST=',I3)
RETURN
END
SUBROUTINE USL(NN)
C
C УСЛОВИЯ ВВОДА
C
3 TYPE 1
1 FORMAT(' ВВЕДИТЕ НОМЕР ВВОДИМОГО ПАРАМЕТРА' /
* 0 - ВЫХОД ИЗ ПРОГРАММЫ' /
* 1 - РАДИУС ФРЕЗЫ' /
* 2 - ШАГ ДЛЯ ПЕЧАТИ' /
* 3 - УГОЛ НАКЛОНА ЗУБЬЕВ ФРЕЗЫ' /
* 4 - ЧИСЛО ЗУБЬЕВ' /
* 5 - СООТНОШЕНИЕ PR:R' /
* 6 - УДЕЛЬНАЯ СИЛА РЕЗАНИЯ' /
* 7 - УГОЛ НАКЛОНА ФРЕЗЫ' /
* 8 - ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ' /
* 9 - РАБОЧАЯ ПОДАЧА' /
* 10 - КООРДИНАТЫ X,Y ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ТОЧКИ' /
* 11 - ДЛИНА ОБРАЗЦА' /
* 12 - ШИРИНА ОБРАЗЦА' /
* 13 - ШИРИНА ОБРАЗЦА' /
* 14 - УДЕЛЬНЫЙ ВЕС' /
* 15 - ШИРИНА УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА' /

```

```

* 16 - ВЫСОТА УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА' /
* 17 - ВЫЛЕТ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА' /
* 18 - МОДУЛЬ ЮНГА' /
* 19 - МОДУЛЬ СДВИГА' /
* 20 - ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ ДЕКРЕМЕНТЫ 1 , 2' /
* 21 - СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ' /
* 22 - ПУТЬ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ' /
* N = 'N)
ACCEPT 22,NN
FORMAT(I2)
IF(NN.GT.22.OR.NN.LT.0) GOTO 3
RETURN
END
SUBROUTINE GRUST

```

0  
0  
0

## ГРАФИК ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ

```

DIMENSION KUST(31,51),IU(2),IT(2),VAR(4,4),FU(31),
* FG(11),H(2)
COMMON/US/KU,KG,IU,VAR,IT,FU,FG,H,KUST
LOGICAL*1 KUST
D TYPE 11,((VAR(I,IU(J)),I=1,4),J=1,2)
111 FORMAT(2X,4A4)
1 WRITE(2,1)(VAR(I,IU(1)),I=1,4),H(1)
1 FORMAT(15X,4A4,' ШАГ ',E12.4/10X,'!')
1 TYPE 1,(VAR(I,IU(1)),I=1,4)
D DO 2 I=IT(1),1,-1
77 TYPE 77,I,(KUST(I,J),J=1,IT(2))
77 FORMAT(2X,I3,50A1)
WRITE(2,4)FU(I),(KUST(I,J),J=1,IT(2))
4 TYPE 4,FU(I),(KUST(I,J),J=1,IT(2))
4 FORMAT(1X,E9.2,'!',50A1)
2 CONTINUE
WRITE(2,6)(FG(I),I=1,KG)
6 TYPE 6,(FG(I),I=1,KG)
6 FORMAT(10X,61(' ')11X,6('!',E9.2))
WRITE(2,88)(VAR(J,IU(2)),J=1,4),H(2)
88 TYPE 88,(VAR(J,IU(2)),J=1,4),H(2)
88 FORMAT(15X,4A4,' ШАГ ',E12.4)
RETURN
END

```

## SUBROUTINE MKEUS

C  
C  
CMKE - СТЕРЖНЕВАЯ ЗАДАЧА  
ПОСТРОЕНИЕ ГМЖ И ГМЖ

D

D

D

D

D

D

C

C

C

C

DIMENSION XNUC(7),FJ(12,7),NBC(6),NFIK(6,6),  
\* GM(42,12),C(6,6)

CALL FALIM(1,'ВЫВОДА.')

READ(2,300)NUS,KLU,NJ

WRITE(1,400)NUS,KLU

300 FORMAT(3I2)

400 FORMAT(' \*\*\* СТЕРЖНЕВАЯ ЗАДАЧА MKE \*\*\*'/

\* ' ЧИСЛО УЗЛОВ',19(' '),I2'

\* ' РЕЖИМ РАБОТЫ',18(' '),I2)

READ(2,301)(XNUC(I),I=1,NUS)

WRITE(1,401)(XNUC(I),I=1,NUS)

301 FORMAT(5F10.5)

401 FORMAT(' КООРДИНАТЫ УЗЛОВ МОДЕЛИ:'/(5F10.4))

302 FORMAT(I2)

310 FORMAT(6I1)

303 FORMAT(I2)

READ(2,304)E,FG,RO

WRITE(1,404)E,FG,RO

304 FORMAT(3F10.1)

404 FORMAT(' УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:'/'

\* ' МОДУЛЬ УПРУГОСТИ 1 РОДА',7(' '),F10.1'

\* ' МОДУЛЬ УПРУГОСТИ 2 РОДА',7(' '),F10.1'

\* ' УДЕЛЬНЫЙ ВЕС МАТЕРИАЛА ',7(' '),F10.1)

NOMER=50.

IF(KLU.EQ.3)NOMER=NUS-1

READ(2,305)((FJ(I,J),I=1,NJ),J=1,NOMER)

IF(KLU.EQ.3)GOTO 420

WRITE(1,405)((FJ(I,J),I=1,NJ),J=1,NOMER)

305 FORMAT(12F10.3)

405 FORMAT(' ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:'/(2X,12F10.3))

GOTO 421

420 CONTINUE

WRITE(1,422)((FJ(I,J),I=1,NJ),J=1,NOMER)

422 FORMAT(' ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:'/(2X,12F10.3))

421 NDF=6

NBD=12

NEQ=NUS\*NDF

300 CALL FORZAK(NUS,XNUC,NB,NBC,NFIK,C)

CALL GLOBNL(E,FG,XNUC,FJ,KLU,NBD,NUS,NJ,

\* NDF,2,NB,NBC,NFIK,C,NEQ,GM)

CALL ASSIGN(3,'STRES.FIL')

DEFINE FILE 3(4,3500,U,I3)

WRITE(3'1)((GM(I,J),J=1,12),I=1,NEQ)

CALL GLOBUS(E,FG,XNUC,FJ,KLU,NBD,NUS,NJ,

\* NDF,2,RO,NEQ,GM)

WRITE(3'2)((GM(I,J),J=1,12),I=1,NEQ)

CALL CLOSE(3)

RETURN

END

SUBROUTINE GLOBUS(E,FG,XNUC,FJ,KLU,NBD,NUS,NJ,

\* NDF,NC,RO,NEQ,GM)

ГЛОБАЛЬНАЯ МАТРИЦА ИНЕРЦИИ, ЕЕ МОДИФИКАЦИЯ

ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:

```

C
C E      - МОДУЛЬ УПРУГОСТИ 1 РОДА
C FG     - МОДУЛЬ УПРУГОСТИ 2 РОДА
C RO     - ПЛОТНОСТЬ
C XNUS   - КООРДИНАТЫ X УЗЛОВ
C FJ     - ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ
C KLU    - КЛЮЧ:
C         =1 - ОБР-КА ЛОПАТКИ ОТ ХВОСТА К ГОЛОВЕ
C         =2 -                   ОТ ГОЛОВЫ К ХВОСТУ
C         =3 - РАСЧЕТ СТЕРЖНЯ
C NBD    - ПОЛОВИНА ШИРИНЫ ЛЕНТЫ МАТРИЦЫ
C NUS    - КОЛИЧЕСТВО УЗЛОВ
C NDF    - ЧИСЛО СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ В УЗЛЕ
C NC     - ЧИСЛО УЗЛОВ В ЭЛЕМЕНТЕ
C
C         ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:
C
C GM     - МАТРИЦА ИНЕРЦИИ
C
C         DIMENSION XNUS(NUS),FJ(NJ,NUS),GM(NEQ,NBD),
C         *         GME(12,12),T(6,6),F(12)
D       CALL CLOSE(2)
D       CALL FALIM(2,'ДЛЯ ОТЛАДКИ.')
D       NE=NUS-1
C         ЗАЧИСЛКА МАССИВА ГММ
D       DO 5 N=1,NEQ
D         DO 5 M=1,NBD
D           5   GM(N,M)=0.
D       TYPE 500,((GM(I,J),J=1,NBD),I=1,NEQ)
D 500  FORMAT(6F10.2)
C         ЦИКЛ ПО ЧИСЛУ ЭЛЕМЕНТОВ
D       DO 400 ID=1,NE
D       WRITE(2,300)ID
D 300  FORMAT(' *** ЭЛЕМЕНТ *** ',I2)
D         M=NDF*(ID-1)+1
D         N=M+11
C         РАСЧЕТ МАТРИЦЫ ИНЕРЦИИ ЭЛЕМЕНТА
D       DO 444 I=1,NJ
D 444  F(I)=FJ(I,ID)
D         GA=F(5)
D       TYPE 501,(F(III),III=1,NJ),GA
D 501  FORMAT(6F12.3)
D         STOC=XNUS(ID+1)-XNUS(ID)
D       TYPE 502,STOC
D 502  FORMAT(F15.3)
D 230  CALL DFCOS(GA,T)
D 970  CALL MI12ST(STOC,F,RO,GME)
D       WRITE(2,222)((GME(IS,JS),JS=1,12),IS=1,12)
D 700  IF(F(5).EQ.0.)GOTO 77
D       CALL MGE12G(GME,T)
D 77   CONTINUE
D       WRITE(2,222)((GME(IS,JS),JS=1,12),IS=1,12)
D 222  FORMAT(' ММЕ В ОБЩЕЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ' /12(2X,12E10.
D     #2') /)
C         ВКЛЮЧЕНИЕ ММЕ ДАННОГО ЭЛЕМЕНТА В ГММ
D       K=0
D       DO 400 I=M,N
D         K=K+1
D         DO 400 J=1,NBD

```

```

        KK=K+J-1
        IF(KK.GT.12)GOTO 499
        GM(I,J)=GM(I,J)+GME(K, KK)
499  CONTINUE
D    WRITE(2, 61)((GM(I,J), J=1, NBD), I=1, NEQ)
      61  FORMAT(2X, 12E9, 1)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE TRMAT(A,B,M,N)
C
C      ТРАНСПОНИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ПРИ ОБЩЕМ
C      СПОСОБЕ ХРАНЕНИЯ
C
C      ПЕРЕМЕТРЫ:
C
C      A  - МАТРИЦА, КОТОРУЮ НЕОБХОДИМО ОБРАТИТЬ, ОДНОМЕРНЫЙ МАСС
C      #NB
C      B  - ТРАНСПОНИРОВАННАЯ МАТРИЦА, ОДНОМЕРНЫЙ МАСС#B
C      M  - ЧИСЛО СТРОК МАТРИЦЫ А И СТОЛБЦОВ МАТРИЦЫ В
C      N  - ЧИСЛО СТОЛБЦОВ МАТРИЦЫ А И СТРОК МАТРИЦЫ В
C
      DIMENSION A(M,N),B(N,M)
      DO 19 I=1,M
        DO 19 J=1,N
          B(J,I)=A(I,J)
19  CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE PR2MAT(A,B,C,M,N,L)
C
C      ПРОИЗВЕДЕНИЕ ДВУХ МАТРИЦ, ХРАНЯЩИХСЯ
C      ОБЩИМ СПОСОБОМ
C
C      ПАРАМЕТРЫ:
C
C      A  - ПЕРВАЯ ВВОДИМАЯ МАТРИЦА, ОДНОМЕРНЫЙ МАСС#B
C      B  - ВТОРАЯ ВВОДИМАЯ МАТРИЦА, ОДНОМЕРНЫЙ МАСС#B
C      R  - ПРОИЗВЕДЕНИЕ ДВУХ МАТРИЦ, ОДНОМЕРНЫЙ МАСС#B
C      M  - ЧИСЛО СТРОК В А
C      N  - ЧИСЛО СТОЛБЦОВ В А И СТРОК В В
C      L  - ЧИСЛО СТОЛБЦОВ В В
C
      DIMENSION A(M,N),B(N,L),C(M,L)
      DO 19 I=1,M
        DO 19 J=1,L
          C(I,J)=0.
19  DO 29 I=1,M
        DO 29 J=1,L
          DO 29 K=1,N
            C(I,J)=C(I,J)+A(I,K)*B(K,J)
29  CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE MI12ST(A,F,RO,GME)
C
C      МАТРИЦА ИНЕРЦИИ ТОНКОСТЕННОГО
C      СТЕРЖНЕВОГО ЭЛЕМЕНТА
C
      DIMENSION B(12,12),C(12,12),F(12),GME(12,12),
      *      R(12,12)

```

```

A1=A*(1)*A0
A2=A**2*A1
A3=A**3*A2
A4=A**4*A3
A5=A**5*A4
A6=A**6*A5
A7=A**7*A6
A=A**7
B1=A(4)/A(1)
B2=A(6)/A(1)
DO I=1,12
DO J=1,12
B(I,J)=0.
C(I,J)=0.
C CONTINUE
B(1,1)=1.
B(2,2)=1.
B(3,3)=-1.
B(4,4)=1.
B(5,5)=1.
B(6,6)=1.
B(7,1)=2./A3
B(7,4)=1./A2
B(7,7)=-2./A3
B(7,10)=1./A2
B(8,2)=2./A3
B(8,5)=-1./A2
B(8,8)=-2./A3
B(8,9)=-1./A2
B(8,2)=-3./A2
B(9,5)=2./A
B(9,8)=3./A2
B(9,9)=1./A
B(10,1)=-3./A2
B(10,4)=-2./A
B(10,7)=3./A2
B(10,10)=-1./A
B(11,5)=-3./A2
B(11,8)=-2./A
B(11,11)=3./A2
B(11,12)=-1./A
B(12,5)=2./A3
B(12,8)=1./A2
B(12,11)=-2./A3
B(12,12)=1./A2
D
WRITE(3,5)((B(I,J),J=1,12),I=1,12)
5 FORMAT(2X,12E10.2)
C(1,1)=A
C(2,2)=A
C(1,4)=A2/2.
C(2,3)=C(1,4)
C(1,10)=A3/3.
C(2,9)=C(1,10)
C(3,3)=C(1,10)
C(4,4)=C(1,10)
C(1,7)=A4/4.
C(2,6)=C(1,7)
C(3,9)=C(1,7)
C(4,10)=C(1,7)
C(3,3)=A5/5.

```

```

C(4,7)=C(3,8)
C(9,9)=C(3,8)
C(10,10)=C(3,8)
C(7,10)=A5/6.
C(8,9)=A6/6.
C(7,7)=A7/7.
C(8,8)=C(7,7)
C(5,5)=D1*A
C(5,6)=D1*A2/2.
C(5,11)=D1*A3/3.
C(5,12)=D1*A4/4.
C(6,6)=C(5,11)+D2*A
C(6,11)=C(5,12)+D2*A2
C(6,12)=D1*A5/5.+D2*A3
C(11,11)=D1*A5/5.+4.*D2*A3/3.
C(11,12)=D1*A6/6.+D2*A4/2.
C(12,12)=D1*A7/7.+9.*D2*A5/5.
DO 8 I=1,12
DO 8 J=1,12
C(J,I)=C(I,J)
8 CONTINUE
CALL TRMAT(B,GME,12,12)
CALL PRMAT(GME,C,R,12,12,12)
CALL PRMAT(R,B,GME,12,12,12)
D WRITE(3,7)
7 FORMAT(///)
D WRITE(3,6)((GME(I,J),J=1,12),I=1,12)
RETURN
END

```



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ВЫБОРОЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА  
УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для иллюстрации работы системы программной адаптации приведено несколько режимов расчета упругих характеристик элементов технологической системы:

- остаточные деформации лопатки;
- упругие деформации лопатки от действия силы резания;
- упругие деформации фрезы от действия силы резания.

Необходимая информация о режимах приведена в соответствующих таблицах.

#### I. Остаточные деформации лопатки.

Для расчета остаточных деформаций выбрана рабочая лопатка 5 ступени турбины К-750. В таблице П2.1 приведены исходные данные для четырех режимов.

Таблица П2.1

Номер режима	Скорость резания, м/мин	Рабочая подача, мм/зуб	Глубина резания, мм	Интегральные остаточные напряжения, н/мм
1	15	0,12	3	74,68
2	20	0,12	3	62,27
3	25	0,12	3	52,39
4	30	0,12	3	37,08

Ниже даны результаты расчета продольной оси лопатки под действием остаточных напряжений.

ПОВЕРХН. СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 1)  
QUN= 0.7468E+02 QNAP= 0.7468E+02  
ВЕКТОР СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

УЗЕЛ	X	Y	MX	MY	MZ	
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ :						
0.399E-15	-0.338E-14	-0.141E-10	-0.649E-11	0.000E+00	0.000E+00	
-0.930E-04	0.896E-03	-0.299E-03	-0.310E-04	0.000E+00	0.000E+00	
-0.293E-03	0.249E-02	-0.497E-03	-0.688E-04	0.000E+00	0.000E+00	
-0.663E-03	0.487E-02	-0.693E-03	-0.116E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.123E-02	0.801E-02	-0.874E-03	-0.166E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.189E-02	0.113E-01	-0.102E-02	-0.211E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.297E-02	0.163E-01	-0.119E-02	-0.268E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.415E-02	0.213E-01	-0.132E-02	-0.323E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.595E-02	0.282E-01	-0.147E-02	-0.396E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.818E-02	0.360E-01	-0.164E-02	-0.497E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.109E-01	0.446E-01	-0.180E-02	-0.599E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.142E-01	0.539E-01	-0.192E-02	-0.699E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.187E-01	0.659E-01	-0.206E-02	-0.822E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.231E-01	0.765E-01	-0.217E-02	-0.936E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.266E-01	0.842E-01	-0.225E-02	-0.103E-02	0.000E+00	0.000E+00	
-0.304E-01	0.922E-01	-0.232E-02	-0.113E-02	0.000E+00	0.000E+00	
-0.364E-01	0.104E+00	-0.243E-02	-0.129E-02	0.000E+00	0.000E+00	
-0.430E-01	0.116E+00	-0.245E-02	-0.132E-02	0.000E+00	0.000E+00	
-0.517E-01	0.132E+00	-0.246E-02	-0.136E-02	0.000E+00	0.000E+00	
-0.592E-01	0.146E+00	-0.247E-02	-0.138E-02	0.000E+00	0.000E+00	
-0.662E-01	0.158E+00	-0.248E-02	-0.139E-02	0.000E+00	0.000E+00	
-0.731E-01	0.171E+00	-0.248E-02	-0.140E-02	0.000E+00	0.000E+00	
-0.773E-01	0.178E+00	-0.248E-02	-0.140E-02	0.000E+00	0.000E+00	

ДЕФОРМАЦИЯ В ТОЧКЕ: Z= 0.9600E+03 X= 0.0000E+00 Y= 0.0000E+00  
Z= 96.00000 X= 0.00000 Y= 0.00000  
ОТКЛОНЕНИЕ D= 0.0000E+00 DX= -0.6617E+00 DY= 0.1581E+01

ПОВЕРХН. СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 1)  
QUN= 0.6227E+02 QNAP= 0.6227E+02  
ВЕКТОР СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

УЗЕЛ	X	Y	MX	MY	MZ	
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ :						
0.361E-15	-0.281E-14	-0.117E-10	-0.541E-11	0.000E+00	0.000E+00	
-0.776E-04	0.747E-03	-0.249E-03	-0.259E-04	0.000E+00	0.000E+00	
-0.244E-03	0.208E-02	-0.415E-03	-0.574E-04	0.000E+00	0.000E+00	
-0.553E-03	0.406E-02	-0.578E-03	-0.970E-04	0.000E+00	0.000E+00	
-0.102E-02	0.667E-02	-0.729E-03	-0.139E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.158E-02	0.944E-02	-0.849E-03	-0.176E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.247E-02	0.136E-01	-0.986E-03	-0.224E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.346E-02	0.177E-01	-0.110E-02	-0.270E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.496E-02	0.235E-01	-0.122E-02	-0.330E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.682E-02	0.300E-01	-0.137E-02	-0.414E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.911E-02	0.372E-01	-0.150E-02	-0.500E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.118E-01	0.450E-01	-0.160E-02	-0.583E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.156E-01	0.549E-01	-0.172E-02	-0.685E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.193E-01	0.638E-01	-0.181E-02	-0.781E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.222E-01	0.702E-01	-0.187E-02	-0.861E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.253E-01	0.769E-01	-0.193E-02	-0.946E-03	0.000E+00	0.000E+00	
-0.304E-01	0.867E-01	-0.202E-02	-0.108E-02	0.000E+00	0.000E+00	
-0.358E-01	0.969E-01	-0.204E-02	-0.110E-02	0.000E+00	0.000E+00	
-0.431E-01	0.110E+00	-0.205E-02	-0.113E-02	0.000E+00	0.000E+00	
-0.494E-01	0.122E+00	-0.206E-02	-0.115E-02	0.000E+00	0.000E+00	
-0.552E-01	0.132E+00	-0.207E-02	-0.116E-02	0.000E+00	0.000E+00	
-0.610E-01	0.142E+00	-0.207E-02	-0.117E-02	0.000E+00	0.000E+00	
-0.645E-01	0.148E+00	-0.207E-02	-0.117E-02	0.000E+00	0.000E+00	

ДЕФОРМАЦИЯ В ТОЧКЕ: Z= 0.9600E+03 X= 0.0000E+00 Y= 0.0000E+00  
Z= 96.00000 X= 0.00000 Y= 0.00000  
ОТКЛОНЕНИЕ D= 0.0000E+00 DX= -0.5517E+00 DY= 0.1319E+01

ПОВЕРХН. СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 1)  
 QUN= 0.4416E+02 QNAP= 0.4416E+02  
 ВЕКТОР СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

УЗЕЛ	X	Y	MX	MY	MZ
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЯ :					
0.255E-15	-0.200E-14	-0.832E-11	-0.384E-11	0.000E+00	0.000E+00
-0.550E-04	0.530E-03	-0.177E-03	-0.183E-04	0.000E+00	0.000E+00
-0.173E-03	0.147E-02	-0.294E-03	-0.407E-04	0.000E+00	0.000E+00
-0.392E-03	0.288E-02	-0.410E-03	-0.688E-04	0.000E+00	0.000E+00
-0.726E-03	0.473E-02	-0.517E-03	-0.984E-04	0.000E+00	0.000E+00
-0.112E-02	0.669E-02	-0.602E-03	-0.125E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.175E-02	0.962E-02	-0.699E-03	-0.159E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.245E-02	0.126E-01	-0.780E-03	-0.191E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.352E-02	0.167E-01	-0.868E-03	-0.234E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.484E-02	0.213E-01	-0.972E-03	-0.284E-03	0.000E+00	0.000E+00
10.0066E+00	0.5254E+00	0.000E+00	0.000E+00		
-0.838E-02	0.319E-01	-0.114E-02	-0.414E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.111E-01	0.390E-01	-0.122E-02	-0.486E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.137E-01	0.452E-01	-0.128E-02	-0.554E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.157E-01	0.498E-01	-0.133E-02	-0.611E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.180E-01	0.545E-01	-0.137E-02	-0.671E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.215E-01	0.615E-01	-0.144E-02	-0.765E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.254E-01	0.687E-01	-0.149E-02	-0.783E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.306E-01	0.782E-01	-0.146E-02	-0.803E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.350E-01	0.862E-01	-0.146E-02	-0.817E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.391E-01	0.935E-01	-0.147E-02	-0.824E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.433E-01	0.101E+00	-0.147E-02	-0.827E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.457E-01	0.105E+00	-0.147E-02	-0.829E-03	0.000E+00	0.000E+00

ДЕФОРМАЦИЯ В ТОЧКЕ: Z= 0.9600E+03 X= 0.0000E+00 Y= 0.0000E+00  
 Z= 96.00000 X= 0.00000 Y= 0.00000  
 ОТКЛОНЕНИЕ D= 0.0000E+00 DX= -0.3913E+00 DY= 0.9351E+00

ПОВЕРХН. СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 1)  
 QUN= 0.3708E+02 QNAP= 0.3708E+02  
 ВЕКТОР СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

УЗЕЛ	X	Y	MX	MY	MZ
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЯ :					
0.212E-15	-0.168E-14	-0.699E-11	-0.322E-11	0.000E+00	0.000E+00
-0.462E-04	0.445E-03	-0.148E-03	-0.154E-04	0.000E+00	0.000E+00
-0.145E-03	0.124E-02	-0.247E-03	-0.342E-04	0.000E+00	0.000E+00
-0.329E-03	0.242E-02	-0.344E-03	-0.578E-04	0.000E+00	0.000E+00
-0.610E-03	0.397E-02	-0.434E-03	-0.826E-04	0.000E+00	0.000E+00
-0.938E-03	0.562E-02	-0.506E-03	-0.105E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.147E-02	0.808E-02	-0.587E-03	-0.133E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.206E-02	0.106E-01	-0.655E-03	-0.161E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.295E-02	0.140E-01	-0.729E-03	-0.197E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.406E-02	0.179E-01	-0.816E-03	-0.247E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.542E-02	0.222E-01	-0.892E-03	-0.298E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.703E-02	0.268E-01	-0.955E-03	-0.347E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.930E-02	0.327E-01	-0.102E-02	-0.408E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.115E-01	0.380E-01	-0.108E-02	-0.465E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.132E-01	0.418E-01	-0.111E-02	-0.513E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.151E-01	0.458E-01	-0.115E-02	-0.563E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.181E-01	0.517E-01	-0.121E-02	-0.642E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.213E-01	0.577E-01	-0.121E-02	-0.658E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.257E-01	0.656E-01	-0.122E-02	-0.674E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.294E-01	0.724E-01	-0.123E-02	-0.686E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.329E-01	0.785E-01	-0.123E-02	-0.692E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.363E-01	0.847E-01	-0.123E-02	-0.695E-03	0.000E+00	0.000E+00
-0.384E-01	0.884E-01	-0.123E-02	-0.696E-03	0.000E+00	0.000E+00

ДЕФОРМАЦИЯ В ТОЧКЕ: Z= 0.9600E+03 X= 0.0000E+00 Y= 0.0000E+00  
 Z= 96.00000 X= 0.00000 Y= 0.00000

## 2. Упругие деформации лопатки от действия силы резания.

Для расчета упругих деформаций выбрана рабочая лопатка 5 ступени турбины К-750. Приведенные в таблице П2.2 пять режимов характеризуют зависимость деформаций лопатки от угла положения режущего инструмента (концевой фрезы). Значения угла положения фрезы и координаты формообразующей точки даны в системе координат лопатки. Для всех пяти режимов координаты формообразующей точки (со стороны наружного профиля) имеют следующие значения:  $Z = 584$  мм;  $Z = 27$  мм;  $Z = 42$  мм. Глубина резания  $t = 3$  мм; рабочая подача  $S_z = 0,1$  мм/зуб; фреза концевая, диаметр 32 мм; число зубьев 6. В таблице П2.2 приведены исходные данные для расчета.

Таблица П2.2

Номер режима	Угол положения фрезы, град.	Составляющие силы резания, НхЮ		
		$P_x$	$P_y$	$M_z$
1	247	92	39	-2801
2	257	85	55	-2076
3	267	78	73	-1302
4	277	69	92	-416
5	287	59	116	664

Ниже приведены результаты расчета деформаций лопатки с приведением вектора деформации в формообразующей точке, разложенного на составляющие: деформация от угла поворота, ,

## УСЛОВИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ

ЧИСЛО ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ 2

ТОЧКА 1 КООРДИНАТА Z 0.0000 УЗЕЛ 1

УСЛОВИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ :

КОД	C(X)	C(Y)	C(MX)	C(MY)	C(MZ)	C(BZ)
111111	0.210E+04	0.210E+04	0.350E+05	0.350E+05	0.100E+05	0.100E+05

ТОЧКА 2 КООРДИНАТА Z 1000.0000 УЗЕЛ 22

УСЛОВИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ :

КОД	C(X)	C(Y)	C(MX)	C(MY)	C(MZ)	C(BZ)
110000	0.170E+04	0.170E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

## СОСРЕДОТОЧЕННАЯ СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 2)

ТОЧКА ПРИЛОЖЕНИЯ: Z= 0.5840E+03

СИЛОВ. ПАРАМЕТРЫ:

X	Y	MX	MY	MZ
0.9200E+02	0.3900E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	-0.2801E+04

РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ :

0.976E-09	0.695E-08	-0.132E-08	0.234E-09	-0.407E-07	-0.199E-10
0.576E-04	0.430E-03	-0.139E-03	0.189E-04	-0.795E-03	-0.123E-03
0.162E-03	0.108E-02	-0.187E-03	0.332E-04	-0.144E-02	-0.170E-03
0.334E-03	0.187E-02	-0.206E-03	0.524E-04	-0.219E-02	-0.194E-03
0.592E-03	0.270E-02	-0.207E-03	0.764E-04	-0.301E-02	-0.211E-03
0.905E-03	0.340E-02	-0.191E-03	0.102E-03	-0.378E-02	-0.229E-03
0.146E-02	0.417E-02	-0.150E-03	0.142E-03	-0.484E-02	-0.252E-03
0.212E-02	0.464E-02	-0.863E-04	0.190E-03	-0.594E-02	-0.283E-03
0.326E-02	0.479E-02	0.231E-04	0.265E-03	-0.740E-02	-0.300E-03
0.482E-02	0.435E-02	0.150E-03	0.354E-03	-0.894E-02	-0.320E-03
0.683E-02	0.327E-02	0.276E-03	0.445E-03	-0.106E-01	-0.343E-03
0.925E-02	0.162E-02	0.376E-03	0.516E-03	-0.124E-01	-0.366E-03
0.124E-01	-0.621E-03	0.422E-03	0.529E-03	-0.149E-01	-0.253E-03
0.148E-01	-0.279E-02	0.367E-03	0.429E-03	-0.150E-01	-0.580E-04
0.161E-01	-0.394E-02	0.292E-03	0.303E-03	-0.151E-01	-0.113E-04
0.168E-01	-0.477E-02	0.181E-03	0.119E-03	-0.151E-01	-0.189E-05
0.165E-01	-0.510E-02	-0.401E-04	-0.259E-03	-0.151E-01	-0.152E-06
0.148E-01	-0.475E-02	-0.981E-04	-0.381E-03	-0.151E-01	-0.224E-07
0.117E-01	-0.383E-02	-0.180E-03	-0.565E-03	-0.151E-01	-0.617E-08
0.812E-02	-0.266E-02	-0.244E-03	-0.738E-03	-0.151E-01	-0.648E-08
0.421E-02	-0.137E-02	-0.268E-03	-0.819E-03	-0.151E-01	-0.193E-08
0.118E-08	0.880E-10	-0.277E-03	-0.852E-03	-0.151E-01	0.486E-08
-0.256E-02	0.631E-03	-0.277E-03	-0.852E-03	-0.151E-01	0.151E-08

ДЕФОРМАЦИЯ В ТОЧКЕ: Z= 0.5840E+03 X= 0.2700E+02 Y= 0.4200E+02

Z= 58.40000 X= 27.00000 Y= 42.00000

ОТКЛОНЕНИЕ D= -0.7447E+00 DX= -0.5626E+00 DY= -0.4109E+00

ПРИЛОЖЕНИЕ № 2

СОСРЕДОТОЧЕННАЯ СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 2) 223

ТОЧКА ПРИЛОЖЕНИЯ: Z= 0.5840E+03

СИЛОВ. ПАРАМЕТРЫ:

X	Y	MX	MY	MZ
0.6500E+02	0.5500E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	-0.2076E+04

РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ :

0.834E-09	0.894E-09	-0.144E-08	0.182E-09	-0.302E-07	-0.148E-10
0.288E-04	0.520E-03	-0.167E-03	0.954E-05	-0.589E-03	-0.915E-04
0.772E-04	0.133E-02	-0.238E-03	0.147E-04	-0.107E-02	-0.126E-03
0.152E-03	0.238E-02	-0.282E-03	0.227E-04	-0.163E-02	-0.144E-03
0.267E-03	0.356E-02	-0.305E-03	0.349E-04	-0.223E-02	-0.156E-03
0.415E-03	0.463E-02	-0.307E-03	0.500E-04	-0.280E-02	-0.170E-03
0.700E-03	0.596E-02	-0.283E-03	0.765E-04	-0.358E-02	-0.187E-03
0.108E-02	0.700E-02	-0.232E-03	0.111E-03	-0.440E-02	-0.210E-03
0.178E-02	0.791E-02	-0.133E-03	0.172E-03	-0.549E-02	-0.222E-03
0.284E-02	0.826E-02	-0.712E-05	0.248E-03	-0.662E-02	-0.237E-03
0.430E-02	0.795E-02	0.132E-03	0.335E-03	-0.786E-02	-0.254E-03
0.619E-02	0.696E-02	0.260E-03	0.415E-03	-0.917E-02	-0.271E-03
0.888E-02	0.501E-02	0.381E-03	0.472E-03	-0.111E-01	-0.187E-03
0.111E-01	0.307E-02	0.394E-03	0.426E-03	-0.112E-01	-0.430E-04
0.125E-01	0.175E-02	0.363E-03	0.340E-03	-0.112E-01	-0.837E-05
0.134E-01	0.601E-03	0.293E-03	0.194E-03	-0.112E-01	-0.140E-05
0.135E-01	-0.426E-03	0.122E-03	-0.136E-03	-0.112E-01	-0.113E-06
0.125E-01	-0.913E-03	0.744E-04	-0.254E-03	-0.112E-01	-0.166E-07
0.102E-01	-0.113E-02	-0.216E-05	-0.445E-03	-0.112E-01	-0.455E-08
0.721E-02	-0.926E-03	-0.686E-04	-0.635E-03	-0.112E-01	-0.478E-08
0.378E-02	-0.509E-03	-0.953E-04	-0.729E-03	-0.112E-01	-0.142E-08
0.154E-08	0.151E-09	-0.105E-03	-0.768E-03	-0.112E-01	0.361E-08
-0.230E-02	0.315E-03	-0.105E-03	-0.768E-03	-0.112E-01	0.113E-08

ДЕФОРМАЦИЯ В ТОЧКЕ: Z= 0.5840E+03 X= 0.2700E+02 Y= 0.4200E+02

Z= 58.40000 X= 27.00000 Y= 42.00000

ОТКЛОНЕНИЕ D= -0.5519E+00 DX= -0.3755E+00 DY= -0.2484E+00

СОСРЕДОТОЧЕННАЯ СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 2)

ТОЧКА ПРИЛОЖЕНИЯ: Z= 0.5840E+03

СИЛОВ. ПАРАМЕТРЫ:

X	Y	MX	MY	MZ
0.7800E+02	0.7300E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	-0.1302E+04

РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ :

0.684E-09	0.112E-07	-0.158E-08	0.126E-09	-0.189E-07	-0.925E-11
-0.251E-05	0.622E-03	-0.199E-03	-0.621E-06	-0.369E-03	-0.574E-04
-0.153E-04	0.162E-02	-0.296E-03	-0.543E-05	-0.672E-03	-0.789E-04
-0.465E-04	0.295E-02	-0.368E-03	-0.967E-05	-0.102E-02	-0.901E-04
-0.877E-04	0.453E-02	-0.415E-03	-0.104E-04	-0.140E-02	-0.979E-04
-0.119E-03	0.602E-02	-0.436E-03	-0.685E-05	-0.176E-02	-0.107E-03
-0.125E-03	0.798E-02	-0.431E-03	0.500E-05	-0.225E-02	-0.117E-03
-0.639E-04	0.964E-02	-0.393E-03	0.263E-04	-0.276E-02	-0.132E-03
0.175E-03	0.114E-01	-0.305E-03	0.705E-04	-0.344E-02	-0.139E-03
0.686E-03	0.126E-01	-0.179E-03	0.135E-03	-0.415E-02	-0.149E-03
0.157E-02	0.131E-01	-0.246E-04	0.217E-03	-0.493E-02	-0.160E-03
0.288E-02	0.129E-01	0.136E-03	0.306E-03	-0.575E-02	-0.170E-03
0.505E-02	0.114E-01	0.338E-03	0.414E-03	-0.693E-02	-0.117E-03
0.715E-02	0.953E-02	0.426E-03	0.427E-03	-0.699E-02	-0.270E-04
0.856E-02	0.800E-02	0.444E-03	0.383E-03	-0.700E-02	-0.525E-05
0.972E-02	0.649E-02	0.418E-03	0.277E-03	-0.700E-02	-0.877E-06
0.104E-01	0.470E-02	0.302E-03	-0.165E-05	-0.700E-02	-0.706E-07
0.101E-01	0.329E-02	0.264E-03	-0.117E-03	-0.700E-02	-0.104E-07
0.864E-02	0.182E-02	0.193E-03	-0.316E-03	-0.700E-02	-0.286E-08
0.628E-02	0.965E-03	0.123E-03	-0.528E-03	-0.700E-02	-0.300E-08
0.333E-02	0.432E-03	0.937E-04	-0.636E-03	-0.700E-02	-0.896E-09
0.194E-08	0.220E-09	0.828E-04	-0.682E-03	-0.700E-02	0.227E-08
-0.205E-02	-0.246E-03	0.828E-04	-0.682E-03	-0.700E-02	0.708E-09

ДЕФОРМАЦИЯ В ТОЧКЕ: Z= 0.5840E+03 X= 0.2700E+02 Y= 0.4200E+02

Z= 58.40000 X= 27.00000 Y= 42.00000

СОСРЕДОТОЧЕННАЯ СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 2)  
 ТОЧКА ПРИЛОЖЕНИЯ: Z= 0.5840E+03  
 СИЛОВ. ПАРАМЕТРЫ:

X	Y	MX	MY	MZ
0.6900E+02	0.9200E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	-0.4160E+03
РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ :				
0.507E-09	0.136E-07	-0.172E-08	0.626E-10	-0.605E-08
-0.375E-04	0.726E-03	-0.232E-03	-0.120E-04	-0.118E-03
-0.118E-03	0.191E-02	-0.356E-03	-0.279E-04	-0.215E-03
-0.267E-03	0.355E-02	-0.458E-03	-0.457E-04	-0.326E-03
-0.482E-03	0.554E-02	-0.532E-03	-0.608E-04	-0.447E-03
-0.713E-03	0.748E-02	-0.574E-03	-0.762E-04	-0.561E-03
-0.104E-02	0.101E-01	-0.591E-03	-0.750E-04	-0.718E-03
-0.134E-02	0.124E-01	-0.568E-03	-0.690E-04	-0.862E-03
-0.162E-02	0.151E-01	-0.492E-03	-0.433E-04	-0.110E-02
-0.173E-02	0.173E-01	-0.368E-03	0.598E-05	-0.133E-02
-0.151E-02	0.187E-01	-0.200E-03	0.828E-04	-0.157E-02
-0.065E-03	0.193E-01	-0.460E-05	0.181E-03	-0.184E-02
0.686E-03	0.185E-01	0.285E-03	0.342E-03	-0.222E-02
0.260E-02	0.166E-01	0.456E-03	0.421E-03	-0.223E-02
0.408E-02	0.149E-01	0.528E-03	0.426E-03	-0.224E-02
0.546E-02	0.130E-01	0.552E-03	0.367E-03	-0.224E-02
0.674E-02	0.104E-01	0.497E-03	0.148E-03	-0.224E-02
0.719E-02	0.794E-02	0.472E-03	0.382E-04	-0.224E-02
0.674E-02	0.505E-02	0.407E-03	-0.167E-03	-0.224E-02
0.513E-02	0.306E-02	0.335E-03	-0.400E-03	-0.224E-02
0.279E-02	0.148E-02	0.303E-03	-0.523E-03	-0.224E-02
0.236E-02	0.295E-03	0.291E-03	-0.576E-03	-0.224E-02
-0.173E-02	-0.874E-03	0.291E-03	-0.576E-03	-0.224E-02

ДЕФОРМАЦИЯ В ТОЧКЕ: Z= 0.5840E+03 X= 0.2700E+02 Y= 0.4200E+02  
 Z= 58.40000 X= 27.00000 Y= 42.00000  
 ОТКЛОНЕНИЕ D= -0.1106E+00 DX= -0.8618E-01 DY= 0.1248E+00

СОСРЕДОТОЧЕННАЯ СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 2)  
 ТОЧКА ПРИЛОЖЕНИЯ: Z= 0.5840E+03  
 СИЛОВ. ПАРАМЕТРЫ:

X	Y	MX	MY	MZ
0.5900E+02	0.1160E+03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.6640E+03
РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ :				
0.239E-09	0.165E-07	-0.120E-08	-0.134E-10	0.965E-06
-0.000E-04	0.863E-03	-0.275E-03	-0.258E-04	0.188E-03
-0.244E-03	0.229E-02	-0.433E-03	-0.552E-04	0.342E-03
-0.536E-03	0.431E-02	-0.571E-03	-0.897E-04	0.520E-03
-0.963E-03	0.683E-02	-0.679E-03	-0.122E-03	0.714E-03
-0.144E-02	0.933E-02	-0.746E-03	-0.147E-03	0.896E-03
-0.216E-02	0.128E-01	-0.790E-03	-0.172E-03	0.115E-02
-0.288E-02	0.160E-01	-0.785E-03	-0.185E-03	0.141E-02
-0.381E-02	0.198E-01	-0.724E-03	-0.181E-03	0.175E-02
-0.465E-02	0.231E-01	-0.601E-03	-0.149E-03	0.212E-02
-0.524E-02	0.257E-01	-0.413E-03	-0.784E-04	0.251E-02
-0.538E-02	0.272E-01	-0.175E-03	0.321E-04	0.293E-02
-0.456E-02	0.271E-01	0.225E-03	0.260E-03	0.354E-02
-0.285E-02	0.253E-01	0.497E-03	0.419E-03	0.357E-02
-0.127E-02	0.233E-01	0.636E-03	0.482E-03	0.357E-02
0.409E-03	0.209E-01	0.720E-03	0.479E-03	0.357E-02
0.242E-02	0.173E-01	0.739E-03	0.331E-03	0.357E-02
0.381E-02	0.136E-01	0.729E-03	0.225E-03	0.357E-02
0.453E-02	0.909E-02	0.671E-03	0.193E-04	0.357E-02
0.382E-02	0.563E-02	0.594E-03	-0.251E-03	0.357E-02
0.217E-02	0.275E-02	0.560E-03	-0.393E-03	0.357E-02
0.290E-03	0.389E-03	0.546E-03	-0.455E-03	0.357E-02
-0.136E-02	-0.164E-02	0.546E-03	-0.455E-03	0.357E-02

ДЕФОРМАЦИЯ В ТОЧКЕ: Z= 0.5840E+03 X= 0.2700E+02 Y= 0.4200E+02  
 Z= 58.40000 X= 27.00000 Y= 42.00000



### 3. Упругие деформации фрезы от действия силы резания.

Для расчета упругих характеристик режущего инструмента была взята концевая фреза с параметрами, приведенными в п.3.3. Было реализовано четыре расчетных режима для различных углов поворота фрезы. В таблице П2.3 приведены исходные данные для расчета

Таблица П2.3

Номер режима	Угол поворота фрезы, град.	Составляющие силы резания, Н x 10		
		$P_x$	$P_y$	$M_z$
1	15	55,4	8,1	2054
2	20	55,1	13,0	1946
3	25	55,0	18,2	1838
4	30	54,9	23,6	1725

Ниже даны результаты расчета деформаций концевой фрезы с разложением вектора деформации на составляющие.

СОСРЕДОТОЧЕННАЯ СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 2) 226

ТОЧКА ПРИЛОЖЕНИЯ: Z= 0.1400E+03

СИЛОВ. ПАРАМЕТРЫ:

X	Y	MX	MY	MZ
0.5540E+02	0.8100E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.2054E+04

РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ :

0.554E-12	0.810E-13	-0.113E-11	0.776E-11	0.205E-10	0.402E-03
0.473E-04	0.692E-05	-0.137E-04	0.935E-04	0.348E-03	0.565E-03
0.198E-02	0.289E-03	-0.121E-03	0.828E-03	0.329E-02	0.542E-03
0.479E-02	0.691E-03	-0.145E-03	0.103E-02	0.459E-02	0.430E-03
0.810E-02	0.116E-02	-0.167E-03	0.116E-02	0.584E-02	0.352E-03
0.117E-01	0.168E-02	-0.173E-03	0.120E-02	0.698E-02	0.422E-03

ДЕФОРМАЦИЯ В ТОЧКЕ: Z= 0.1400E+03 X= 0.1600E+02 Y= 0.0000E+00

Z= 14.000000 X= 16.000000 Y= 0.000000

ОТКЛОНЕНИЕ D= 0.1116E+00 DX= 0.1165E+00 DY= 0.1284E+00

СОСРЕДОТОЧЕННАЯ СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 2)

ТОЧКА ПРИЛОЖЕНИЯ: Z= 0.1400E+03

СИЛОВ. ПАРАМЕТРЫ:

X	Y	MX	MY	MZ
0.5510E+02	0.1300E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1946E+04

РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ :

0.551E-12	0.130E-12	-0.182E-11	0.771E-11	0.195E-10	0.381E-03
0.471E-04	0.111E-04	-0.219E-04	0.930E-04	0.330E-03	0.536E-03
0.197E-02	0.464E-03	-0.194E-03	0.823E-03	0.312E-02	0.513E-03
0.476E-02	0.112E-02	-0.237E-03	0.103E-02	0.435E-02	0.407E-03
0.805E-02	0.188E-02	-0.271E-03	0.115E-02	0.553E-02	0.334E-03
0.116E-01	0.271E-02	-0.280E-03	0.119E-02	0.661E-02	0.400E-03

ДЕФОРМАЦИЯ В ТОЧКЕ: Z= 0.1400E+03 X= 0.1600E+02 Y= 0.0000E+00

Z= 14.000000 X= 16.000000 Y= 0.000000

ОТКЛОНЕНИЕ D= 0.1058E+00 DX= 0.1159E+00 DY= 0.1329E+00

СОСРЕДОТОЧЕННАЯ СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 2)

ТОЧКА ПРИЛОЖЕНИЯ: Z= 0.1400E+03

СИЛОВ. ПАРАМЕТРЫ:

X	Y	MX	MY	MZ
0.5500E+02	0.1820E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1838E+04

РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ :

0.550E-12	0.182E-12	-0.255E-11	0.770E-11	0.184E-10	0.360E-03
0.470E-04	0.155E-04	-0.307E-04	0.928E-04	0.311E-03	0.506E-03
0.196E-02	0.650E-03	-0.272E-03	0.822E-03	0.295E-02	0.485E-03
0.475E-02	0.157E-02	-0.335E-03	0.102E-02	0.411E-02	0.384E-03
0.803E-02	0.265E-02	-0.380E-03	0.115E-02	0.522E-02	0.315E-03
0.116E-01	0.381E-02	-0.394E-03	0.119E-02	0.624E-02	0.378E-03

ДЕФОРМАЦИЯ В ТОЧКЕ: Z= 0.1400E+03 X= 0.1600E+02 Y= 0.0000E+00

Z= 14.000000 X= 16.000000 Y= 0.000000

ОТКЛОНЕНИЕ D= 0.9991E-01 DX= 0.1156E+00 DY= 0.1380E+00

СОСРЕДОТОЧЕННАЯ СИЛА (КОД ЗАДАНИЯ - 2)

ТОЧКА ПРИЛОЖЕНИЯ: Z= 0.1400E+03

СИЛОВ. ПАРАМЕТРЫ:

X	Y	MX	MY	MZ
0.5490E+02	0.2360E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1725E+04

РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ :

0.549E-12	0.236E-12	-0.330E-11	0.769E-11	0.172E-10	0.338E-03
0.469E-04	0.202E-04	-0.398E-04	0.926E-04	0.292E-03	0.475E-03
0.196E-02	0.843E-03	-0.353E-03	0.820E-03	0.277E-02	0.455E-03
0.474E-02	0.203E-02	-0.436E-03	0.102E-02	0.385E-02	0.361E-03
0.802E-02	0.344E-02	-0.494E-03	0.115E-02	0.490E-02	0.296E-03
0.115E-01	0.496E-02	-0.512E-03	0.119E-02	0.586E-02	0.355E-03

ДЕФОРМАЦИЯ В ТОЧКЕ: Z= 0.1400E+03 X= 0.1600E+02 Y= 0.0000E+00

Z= 14.000000 X= 16.000000 Y= 0.000000

ОТКЛОНЕНИЕ D= 0.9770E-01 DX= 0.1154E+00 DY= 0.1477E+00

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
ОСНОВНЫХ РЕЖИМОВ ДВУХЧАСТОТНОГО  
ДИНАМИЧЕСКОГО СТЕНДА

ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ  
ДВУХЧАСТОТНОЙ МОДЕЛИ

РАДИУС ФРЕЗЫ (ММ) 22.00000  
 ШАГ ДЛЯ ПЕЧАТИ (ГРАД) 10  
 УГОЛ НАКЛОНА ЗУБЬЕВ ФРЕЗЫ (ГРАД) 30.00000  
 ЧИСЛО ЗУБЬЕВ (-) 6  
 СООТНОШЕНИЕ PR:R (-) 0.70000  
 УДЕЛЬНАЯ СИЛА РЕЗАНИЯ (Н/ММ) 3000.00000  
 УГОЛ НАКЛОНА ФРЕЗЫ (ГРАД) 25.00000  
 ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ (ММ) 2.00000  
 РАБОЧАЯ ПОДАЧА (ММ/ЗУБ) 0.10000  
 КООРДИНАТЫ X, Y ФОРМООБР. ТОЧКИ (ММ) 20.00000 40.00000

ОБРАЗЕЦ:

ДЛИНА (ММ)  
135.00000

ОБРАЗЕЦ:

ШИРИНА (ММ)  
70.00000

ОБРАЗЕЦ:

ВЫСОТА (ММ)  
30.00000

ОБРАЗЕЦ:

УДЕЛЬНЫЙ ВЕС (\*1.E-6 КГ/ММ\*\*3)  
7.85000

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ШИРИНА (ММ)  
50.00000

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫСОТА (ММ)  
10.00000

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)  
110.00000

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

МОДУЛЬ ЮНГА (Н/ММ\*\*2)  
200000.0

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

МОДУЛЬ СДВИГА (Н/ММ\*\*2)  
80000.0

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ЛОГОРИФМИЧЕСКИЕ ДЕКРЕМЕНТЫ 1, 2 (-)  
0.0900 0.1500

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ (М/МИН)  
25.00000

ПУТЬ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ (ММ)  
0.60000

1 - MIN= 10.00000 MAX= 60.00000  
2 - MIN= 0.50000 MAX= 4.00000

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ШАГ 0.3333E+01

0.57E+02! \*\*\*\*\*  
0.53E+02! \*\*\*\*\*  
0.50E+02! \*\*\*\*\*  
0.47E+02! \*\*\*\*\*  
0.43E+02! \*\*\*\*\*  
0.40E+02! \*\*\*\*\*  
0.37E+02! \*\*\*\*\*  
0.33E+02! \*\*\*\*\*  
0.30E+02! \*\*\*\*\*  
0.27E+02! \*\*\*\*\*  
0.23E+02! \*\*\*\*\*  
0.20E+02! \*\*\*\*\*  
0.17E+02! \*\*\*\*\*  
0.13E+02! \*\*\*\*\*  
0.10E+02! \*\*\*\*\*

-----  
1 0.50E+00! 0.17E+01! 0.28E+01!  
ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ ШАГ 0.1167E+00

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0.1878E+04	0.1091E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0.1462E+03	0.2791E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0.4134E-04	0.1315E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0.1580E+00	0.2383E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0.1935E+01	0.1123E+03

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

100.00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ = ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ

1 - MIN= 10.00000 MAX= 60.00000  
2 - MIN= 0.50000 MAX= 4.00000

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ШАГ 0.3333E+01

0.57E+02! \*\*\*\*\*  
0.53E+02! \*\*\*\*\*  
0.50E+02! \*\*\*\*\*  
0.47E+02! \*\*\*\*\*  
0.43E+02! \*\*\*\*\*  
0.40E+02! \*\*\*\*\*  
0.37E+02! \*\*\*\*\*  
0.33E+02! \*\*\*\*\*  
0.30E+02! \*\*\*\*\*  
0.27E+02! \*\*\*\*\*  
0.23E+02! \*\*\*\*\*  
0.20E+02! \*\*\*\*\*  
0.17E+02! \*\*\*\*\*  
0.13E+02! \*  
0.10E+02!

-----  
1 0.50E+00! 0.17E+01! 0.28E+01!  
ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ ШАГ 0.1167E+00

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0.2500E+04	0.1200E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0.1687E+03	0.2927E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0.4769E-04	0.1380E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0.1580E+00	0.2383E+02

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ - ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ  
 1 - MIN= 10,00000 MAX= 60,00000  
 2 - MIN= 0,00000 MAX= 4,00000

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ШАГ 0,3333E+01

0,57E+02! \*\*\*\*\*  
 0,53E+02! \*\*\*\*\*  
 0,50E+02! \*\*\*\*\*  
 0,47E+02! \*\*\*\*\*  
 0,43E+02! \*\*\*\*\*  
 0,40E+02! \*\*\*\*\*  
 0,37E+02! \*\*\*\*\*  
 0,33E+02! \*\*\*\*\*  
 0,30E+02! \*\*\*\*\*  
 0,27E+02! \*\*\*\*\*  
 0,23E+02! \*\*\*\*\*  
 0,20E+02! \*\*\*\*\*  
 0,17E+02! \*\*\*\*\*  
 0,13E+02! \*\*\*\*\*  
 0,10E+02! \*\*\*\*\*

-----  
 1 0,00E+00! 0,13E+01! 0,27E+01!  
 ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ ШАГ 0,1333E+00

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0,3429E+04	0,1333E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0,1976E+03	0,3086E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0,5586E-04	0,1454E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0,1590E+00	0,2387E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0,1922E+01	0,1115E+03

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)  
80,00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ - ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ  
 1 - MIN= 10,00000 MAX= 60,00000  
 2 - MIN= 0,50000 MAX= 4,00000

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ШАГ 0,3333E+01

0,57E+02! \*\*\*\*\*  
 0,53E+02! \*\*\*\*\*  
 0,50E+02! \*\*\*\*\*  
 0,47E+02! \*\*\*\*\*  
 0,43E+02! \*\*\*\*\*  
 0,40E+02! \*\*\*\*\*  
 0,37E+02! \*\*\*\*\*  
 0,33E+02! \*\*\*\*\*  
 0,30E+02! \*\*\*\*\*  
 0,27E+02! \*\*\*\*\*  
 0,23E+02! \*\*\*\*\*  
 0,20E+02! \*\*\*\*\*  
 0,17E+02! \*\*\*\*\*  
 0,13E+02! \*\*\*\*\*  
 0,10E+02! \*\*\*\*\*

-----  
 1 0,50E+00! 0,17E+01! 0,28E+01!  
 ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ ШАГ 0,1167E+00

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0,4883E+04	0,1500E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0,2357E+03	0,3273E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0,6666E-04	0,1542E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0,1580E+00	0,2383E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0,1935E+01	0,1123E+03

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:  
 СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ = ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ  
 1 - MIN= 10.00000 MAX= 60.00000  
 2 - MIN= 0.50000 MAX= 4.00000

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ШАГ 0.3333E+01  
 ↓  
 0.57E+02! \*\*\*\*\*  
 0.53E+02! \*\*\*\*\*  
 0.50E+02! \*\*\*\*\*  
 0.47E+02! \*\*\*\*\*  
 0.43E+02! \*\*\*\*\*  
 0.40E+02! \*\*\*\*\*  
 0.37E+02! \*\*\*\*\*  
 0.33E+02! \*\*\*\*\*  
 0.30E+02! \*\*\*\*\*  
 0.27E+02! \*\*\*\*\*  
 0.23E+02! \*  
 0.20E+02!  
 0.17E+02!  
 0.13E+02!  
 0.10E+02!

-----  
 1 0.50E+00! 0.17E+01! 0.28E+01!  
 ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ ШАГ 0.1167E+00

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ  
 КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ..... 0.7289E+04 0.1714E+08  
 СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ..... 0.2880E+03 0.3499E+03  
 ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ..... 0.8144E+04 0.1649E+00  
 КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р..... 0.1580E+00 0.2383E+02  
 КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ..... 0.1935E+01 0.1123E+03  
 ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ (ММ) 2.00000

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:  
 ВЫЛЕТ (ММ)  
 110.000000  
 ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ (ММ) 2.00000  
 ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:  
 СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ = УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ  
 1 - MIN= 10.00000 MAX= 60.00000  
 2 - MIN= 5.00000 MAX= 45.00000

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ШАГ 0.5000E+01  
 ↓  
 0.55E+02! \*\*\*\*\*  
 0.50E+02! \*\*\*\*\*  
 0.45E+02! \*\*\*\*\*  
 0.40E+02! \*\*\*\*\*  
 0.35E+02! \*\*\*\*\*  
 0.30E+02! \*\*\*\*\*  
 0.25E+02! \*\*\*\*\*  
 0.20E+02! \*\*\*\*\*  
 0.15E+02! \*\*\*\*\*  
 0.10E+02! \*

-----  
 1 0.50E+01! 0.25E+02!  
 УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ ШАГ 0.2000E+01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ  
 КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ..... 0.1878E+04 0.1091E+08  
 СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ..... 0.1462E+03 0.2791E+03  
 ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ..... 0.4134E+04 0.1315E+00

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

100,00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ - УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ

1 - MIN= 10,00000 MAX= 60,00000

2 - MIN= 5,00000 MAX= 45,00000

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ШАГ 0,5000E+01

0,55E+02!\*\*\*\*\*  
 0,50E+02!\*\*\*\*\*  
 0,45E+02!\*\*\*\*\*  
 0,40E+02!\*\*\*\*\*  
 0,35E+02!\*\*\*\*\*  
 0,30E+02!\*\*\*\*\*  
 0,25E+02!\*\*\*\*\*  
 0,20E+02!\*\*\*\*\*  
 0,15E+02!\*\*\*  
 0,10E+02!\*\*\*\*\*

-----  
 1 0,50E+01! 0,25E+02!  
 УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ ШАГ 0,2000E+01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0,2500E+04	0,1200E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0,1687E+03	0,2927E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0,4769E-04	0,1380E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0,4126E+00	0,1841E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0,1784E+01	0,3505E+02

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

90,00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ - УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ

1 - MIN= 10,00000 MAX= 60,00000

2 - MIN= 5,00000 MAX= 45,00000

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ШАГ 0,5000E+01

0,55E+02!\*\*\*\*\*  
 0,50E+02!\*\*\*\*\*  
 0,45E+02!\*\*\*\*\*  
 0,40E+02!\*\*\*\*\*  
 0,35E+02!\*\*\*\*\*  
 0,30E+02!\*\*\*\*\*  
 0,25E+02!\*\*\*\*\*  
 0,20E+02!\*\*\*\*  
 0,15E+02!\*\*  
 0,10E+02!\*

-----  
 1 0,50E+01! 0,25E+02!  
 УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ ШАГ 0,2000E+01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0,3429E+04	0,1333E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0,1976E+03	0,3086E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0,5586E-04	0,1454E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0,4126E+00	0,1841E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0,1784E+01	0,3505E+02



## УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

80,00000

## ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ - УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ

1 - MIN= 10,00000 MAX= 60,00000

2 - MIN= 5,00000 MAX= 45,00000

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ШАГ 0,5000E+01

```

0,55E+02!*****
0,50E+02!*****
0,45E+02!*****
0,40E+02!*****
0,35E+02!*****
0,30E+02!*****
0,25E+02!****
0,20E+02!***
0,15E+02!**
0,10E+02!

```

-----  
1 0,50E+01! 0,25E+02!

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ ШАГ 0,2000E+01

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0,4883E+04	0,1500E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0,2357E+03	0,3273E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ.....	0,6666E-04	0,1542E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0,4126E+00	0,1841E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0,1784E+01	0,3505E+02

## УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

70,00000

## ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ - УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ

1 - MIN= 10,00000 MAX= 60,00000

2 - MIN= 5,00000 MAX= 45,00000

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ШАГ 0,5000E+01

```

0,55E+02!*****
0,50E+02!*****
0,45E+02!*****
0,40E+02!*****
0,35E+02!*****
0,30E+02!****
0,25E+02!**
0,20E+02!*
0,15E+02!
0,10E+02!

```

-----  
1 0,50E+01! 0,25E+02!

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ ШАГ 0,2000E+01

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0,7289E+04	0,1714E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0,2880E+03	0,3499E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ.....	0,8144E-04	0,1649E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0,4126E+00	0,1841E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0,1784E+01	0,3505E+02
УГОЛ НАКЛОНА ФРЕЗЫ (ГРАД) 25,00000		

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

110.00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ - РАБОЧАЯ ПОДАЧА

1 - MIN= 10.00000 MAX= 60.00000

2 - MIN= 0.05000 MAX= 0.35000

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ШАГ 0.5000E+01

0.55E+02!\*\*\*\*\*  
 0.50E+02!\*\*\*\*\*  
 0.45E+02!\*\*\*\*\*  
 0.40E+02!\*\*\*\*\*  
 0.35E+02!\*\*\*\*\*  
 0.30E+02!\*\*\*\*\*  
 0.25E+02!\*\*\*\*\*  
 0.20E+02!\*\*\*\*\*  
 0.15E+02!\*\*\*\*\*  
 0.10E+02!

-----  
 1 0.50E-01! 0.20E+00!  
 РАБОЧАЯ ПОДАЧА ШАГ 0.1500E-01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0.1878E+04	0.1091E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0.1462E+03	0.2791E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0.4134E-04	0.1315E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0.2032E+00	0.2723E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0.1096E+01	0.4122E+02

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

100.00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ - РАБОЧАЯ ПОДАЧА

1 - MIN= 10.00000 MAX= 60.00000

2 - MIN= 0.05000 MAX= 0.35000

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ШАГ 0.5000E+01

0.55E+02!\*\*\*\*\*  
 0.50E+02!\*\*\*\*\*  
 0.45E+02!\*\*\*\*\*  
 0.40E+02!\*\*\*\*\*  
 0.35E+02!\*\*\*\*\*  
 0.30E+02!\*\*\* \*\*\*\*\*  
 0.25E+02! \*

0.20E+02!  
 0.15E+02!  
 0.10E+02!

-----  
 1 0.50E-01! 0.20E+00!  
 РАБОЧАЯ ПОДАЧА ШАГ 0.1500E-01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0.2500E+04	0.1200E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0.1687E+03	0.2927E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0.4769E-04	0.1380E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0.2032E+00	0.2723E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0.1096E+01	0.4122E+02

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

90.00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ = РАБОЧАЯ ПОДАЧА  
 1 = MIN= 10.00000 MAX= 60.00000  
 2 = MIN= 0.05000 MAX= 0.35000

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ШАГ 0.5000E+01

0.55E+02!\*\*\*\*\*  
 0.50E+02!\*\*\*\*\*  
 0.45E+02!\*\*\*\*\*  
 0.40E+02!\*\*\*\*\*  
 0.35E+02!  
 0.30E+02!  
 0.25E+02!  
 0.20E+02!  
 0.15E+02!  
 0.10E+02!

-----  
 1 0.50E-01! 0.20E+00!  
 РАБОЧАЯ ПОДАЧА ШАГ 0.1500E-01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0.3429E+04	0.1333E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0.1976E+03	0.3086E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ.....	0.5586E-04	0.1454E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0.2032E+00	0.2723E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0.1096E+01	0.4122E+02

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

80.00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ = РАБОЧАЯ ПОДАЧА  
 1 = MIN= 10.00000 MAX= 60.00000  
 2 = MIN= 0.05000 MAX= 0.35000

СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ШАГ 0.5000E+01

0.55E+02!\*\*\*\*\*  
 0.50E+02!\*\*  
 0.45E+02!

0.40E+02!  
 0.35E+02!  
 0.30E+02!  
 0.25E+02!  
 0.20E+02!  
 0.15E+02!  
 0.10E+02!

-----  
 1 0.50E-01! 0.20E+00!  
 РАБОЧАЯ ПОДАЧА ШАГ 0.1500E-01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0.4883E+04	0.1500E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0.2357E+03	0.3273E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ.....	0.6666E-04	0.1542E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0.2032E+00	0.2723E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0.1096E+01	0.4122E+02

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ УГРЕЗЫ УГРЕЗЫ 0.000000 236  
РАБОЧАЯ ПОДАЧА (ММ/ЗУБ) 0.100000  
СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ (М/МИН) 25.000000

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:  
ВЫЛЕТ (ММ) 110.000000  
ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ (ММ) 2.000000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:  
УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ - РАБОЧАЯ ПОДАЧА  
1 - MIN= 5.000000 MAX= 45.000000  
2 - MIN= 0.050000 MAX= 0.350000

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ ШАГ 0.4000E+01

0.41E+02!\*\*\*\*\*  
0.37E+02!\*\*\*\*\*  
0.33E+02!\*\*\*\*\*  
0.29E+02!\*\*\*\*\*  
0.25E+02!\*\*\*\*\*  
0.21E+02!\*\*\*\*\*  
0.17E+02!\*\*\*\*\*  
0.13E+02!\*\*\*\*\*  
0.90E+01!\*\*\*\*\*  
0.50E+01!\*\*\*\*\*

-----  
1 0.50E-01! 0.20E+00!  
РАБОЧАЯ ПОДАЧА ШАГ 0.1500E-01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ  
КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ..... 0.1878E+04 0.1091E+08  
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ..... 0.1462E+03 0.2791E+03  
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ..... 0.4134E-04 0.1315E+00  
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р..... 0.3908E+00 0.1945E+02  
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ..... 0.1814E+01 0.2703E+02

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:  
ВЫЛЕТ (ММ) 100.000000  
ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ - РАБОЧАЯ ПОДАЧА  
1 - MIN= 5.000000 MAX= 45.000000  
2 - MIN= 0.050000 MAX= 0.350000

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ ШАГ 0.4000E+01

0.41E+02!\*\*\*\*\*  
0.37E+02!\*\*\*\*\*  
0.33E+02!\*\*\*\*\*  
0.29E+02!\*\*\*\*\*  
0.25E+02! \*  
0.21E+02!  
0.17E+02!\*\*\*\*\*  
0.13E+02!\*\*\*\*\*  
0.90E+01!\*\*\*\*\*  
0.50E+01!\*\*\*\*\*

-----  
1 0.50E-01! 0.20E+00!  
РАБОЧАЯ ПОДАЧА ШАГ 0.1500E-01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ  
КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ..... 0.2500E+04 0.1200E+08  
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ..... 0.1687E+03 0.2927E+03  
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ..... 0.4769E-04 0.1380E+00  
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р..... 0.3908E+00 0.1945E+02

РЕЕСТРАЦИЯ № 9187 П.П.П.

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

90.00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ = РАБОЧАЯ ПОДАЧА  
 1 - MIN= 5.00000 MAX= 45.00000  
 2 - MIN= 0.05000 MAX= 0.35000

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ ШАГ 0.4000E+01

0.41E+02!\*\*\*\*\*  
 0.37E+02!\*\*\*\*\*  
 0.33E+02!\*\*\*\*\*  
 0.29E+02!  
 0.25E+02!  
 0.21E+02!  
 0.17E+02!\*\*\*\*  
 0.13E+02!\*\*\*\*\*  
 0.90E+01!\*\*\*\*\*  
 0.50E+01!\*\*\*\*\*

-----  
 1 0.50E-01! 0.20E+00!  
 РАБОЧАЯ ПОДАЧА ШАГ 0.1500E-01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0.3429E+04	0.1333E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0.1976E+03	0.3086E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0.5586E-04	0.1454E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0.3908E+00	0.1945E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0.1814E+01	0.2703E+02

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

80.00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ = РАБОЧАЯ ПОДАЧА  
 1 - MIN= 5.00000 MAX= 45.00000  
 2 - MIN= 0.05000 MAX= 0.35000

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ ШАГ 0.4000E+01

0.41E+02!\*\*\*\*\*  
 0.37E+02! \*\*\*\*\*  
 0.33E+02!  
 0.29E+02!  
 0.25E+02!  
 0.21E+02!  
 0.17E+02!  
 0.13E+02!\*  
 0.90E+01!\*\*\*\*\*  
 0.50E+01!\*\*\*\*\*

-----  
 1 0.50E-01! 0.20E+00!  
 РАБОЧАЯ ПОДАЧА ШАГ 0.1500E-01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0.4883E+04	0.1500E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0.2357E+03	0.3273E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0.6666E-04	0.1542E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0.3908E+00	0.1945E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0.1814E+01	0.2703E+02

## УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)  
70.00000

## ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ - РАБОЧАЯ ПОДАЧА  
1 - MIN= 5.00000 MAX= 45.00000  
2 - MIN= 0.05000 MAX= 0.35000

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ ШАГ 0.4000E+01

0.41E+02!  
0.37E+02!  
0.33E+02!  
0.29E+02!  
0.25E+02!  
0.21E+02!  
0.17E+02!  
0.13E+02!  
0.90E+01!  
0.50E+01!\*\*\*\*\*

-----  
1 0.50E-01! 0.20E+00!  
РАБОЧАЯ ПОДАЧА ШАГ 0.1500E-01

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0.7289E+04	0.1714E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0.2880E+03	0.3499E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0.8144E-04	0.1649E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0.3908E+00	0.1945E+02

КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0.1814E+01	0.2703E+02
-------------------------------	------------	------------

## УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)  
110.00000

## ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ - ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ  
1 - MIN= 5.00000 MAX= 45.00000  
2 - MIN= 0.50000 MAX= 4.00000

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ ШАГ 0.4000E+01

0.41E+02!\*\*\*\*\*  
0.37E+02! \*\*\*\*\*  
0.33E+02! \*\*\*\*\*  
0.29E+02! \*\*\*\*\*  
0.25E+02! \*\*\*\*\*  
0.21E+02! \*\*\*\*\*  
0.17E+02! \*\*\*\*\*  
0.13E+02! \*\*\*\*\*  
0.90E+01! \*\*\*\*\*  
0.50E+01! \*\*\*\*\*

-----  
1 0.50E+00! 0.23E+01!  
ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ ШАГ 0.1750E+00

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0.1878E+04	0.1091E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0.1462E+03	0.2791E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0.4134E-04	0.1315E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0.4163E+00	0.1993E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0.3000E+01	0.7210E+02

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:  
 ВЫЛЕТ (ММ)  
 100,00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:  
 УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ = ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ  
 1 - MIN= 5,00000 MAX= 45,00000  
 2 - MIN= 0,50000 MAX= 4,00000

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ      ШАГ      0,4000E+01  
 ↓  
 0,41E+02! \*\*\*\*\*  
 0,37E+02! \*\*\*\*\*  
 0,33E+02! \*\*\*\*\*  
 0,29E+02! \*\*\*\*\*  
 0,25E+02! \*\*\*\*\*  
 0,21E+02! \*\*\*\*\*  
 0,17E+02! \*\*\*\*\*  
 0,13E+02! \*\*\*\*\*  
 0,90E+01! \*\*\*\*\*  
 0,50E+01! \*\*\*\*\*

-----  
 1 0,50E+00! 0,23E+01!  
           ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ      ШАГ      0,1750E+00

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ  
 КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ..... 0,2500E+04    0,1200E+08  
 СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ..... 0,1687E+03    0,2927E+03  
 ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ..... 0,4769E-04    0,1380E+00  
 КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р..... 0,4163E+00    0,1993E+02  
 КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ..... 0,3000E+01    0,7210E+02

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:  
 ВЫЛЕТ (ММ)  
 90,00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:  
 УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ = ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ  
 1 - MIN= 5,00000 MAX= 45,00000  
 2 - MIN= 0,50000 MAX= 4,00000

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ      ШАГ      0,4000E+01  
 ↓  
 0,41E+02! \*\*\*\*\*  
 0,37E+02! \*\*\*\*\*  
 0,33E+02! \*\*\*\*\*  
 0,29E+02! \*\*\*\*\*  
 0,25E+02! \*\*\*\*\*  
 0,21E+02! \*\*\*\*\*  
 0,17E+02! \*\*\*\*\*  
 0,13E+02! \*\*\*\*\*  
 0,90E+01! \*\*\*\*\*  
 0,50E+01! \*\*\*\*\*

-----  
 1 0,50E+00! 0,23E+01!  
           ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ      ШАГ      0,1750E+00

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ  
 КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ..... 0,3429E+04    0,1333E+08  
 СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ..... 0,1976E+03    0,3086E+03  
 ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ..... 0,5586E-04    0,1454E+00  
 КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р..... 0,4163E+00    0,1993E+02  
 КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ..... 0,3000E+01    0,7210E+02

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)  
80.00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ = ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ  
1 - MIN= 5.00000 MAX= 45.00000  
2 - MIN= 0.50000 MAX= 4.00000

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ ШАГ 0.4000E+01

0.41E+02!	*****
0.37E+02!	*****
0.33E+02!	*****
0.29E+02!	****
0.25E+02!	*****
0.21E+02!	*****
0.17E+02!	*****
0.13E+02!	*****
0.90E+01!	*****
0.50E+01!	*****

-----  
1 0.50E+00! 0.23E+01!  
ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ ШАГ 0.1750E+00

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0.4883E+04	0.1500E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0.2357E+03	0.3273E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0.6666E-04	0.1542E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0.4163E+00	0.1993E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0.3000E+01	0.7210E+02

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)  
70.00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ = ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ  
1 - MIN= 5.00000 MAX= 45.00000  
2 - MIN= 0.50000 MAX= 4.00000

УГОЛ ПОЛОЖЕНИЯ ШАГ 0.4000E+01

0.41E+02!	*****
0.37E+02!	**
0.33E+02!	
0.29E+02!	
0.25E+02!	**
0.21E+02!	***
0.17E+02!	*****
0.13E+02!	*****
0.90E+01!	*****
0.50E+01!	*****

-----  
1 0.50E+00! 0.23E+01!  
ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ ШАГ 0.1750E+00

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0.7289E+04	0.1714E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0.2880E+03	0.3499E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0.8144E-04	0.1649E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0.4163E+00	0.1993E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0.3000E+01	0.7210E+02



УГОЛ НАКЛОНА ФРЕЗЫ (ГРАД) 25.00000

ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ (ММ) 2.00000

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

110.00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ - РАБОЧАЯ ПОДАЧА

1 - MIN= 0.50000 MAX= 4.00000

2 - MIN= 0.05000 MAX= 0.35000

ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ ШАГ 0.3500E+00

0.36E+01!\*\*\*\*\*  
0.33E+01!\*\*\*\*\*  
0.30E+01!\*\*\*\*\*  
0.26E+01!\*\*\*\*\*  
0.23E+01!\*\*\*\*\*

0.19E+01!\*\*\*\*\*  
0.15E+01! \*\*\*\*\*  
0.12E+01!  
0.85E+00!  
0.50E+00!

-----  
! 0.50E-01! 0.20E+00!  
РАБОЧАЯ ПОДАЧА ШАГ 0.1500E-01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ..... 0.1878E+04 0.1091E+08  
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ..... 0.1462E+03 0.2791E+03  
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ..... 0.4134E-04 0.1315E+00  
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р..... 0.1704E+00 0.2449E+02  
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ..... 0.2153E+01 0.9072E+02

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

100.00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ - РАБОЧАЯ ПОДАЧА

1 - MIN= 0.50000 MAX= 4.00000

2 - MIN= 0.05000 MAX= 0.35000

ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ ШАГ 0.3500E+00

0.36E+01!\*\*\*\*\*  
0.33E+01!\*\*\*\*\*  
0.30E+01!\*\*\*\*\*  
0.26E+01!\*\*\*\*\*  
0.23E+01!\*\*\* \*\*\*\*\*  
0.19E+01!  
0.15E+01!  
0.12E+01!  
0.85E+00!  
0.50E+00!

-----  
! 0.50E-01! 0.20E+00!  
РАБОЧАЯ ПОДАЧА ШАГ 0.1500E-01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ..... 0.2500E+04 0.1200E+08  
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ..... 0.1687E+03 0.2927E+03  
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ..... 0.4769E-04 0.1380E+00  
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р..... 0.1704E+00 0.2449E+02  
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ..... 0.2153E+01 0.9072E+02

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

90.00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ = РАБОЧАЯ ПОДАЧА

1 - MIN= 0.50000 MAX= 4.00000

2 - MIN= 0.05000 MAX= 0.35000

ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ ШАГ 0.3500E+00

0.36E+01!\*\*\*\*\*  
0.33E+01!\*\*\*\*\*

0.30E+01!\*\*\*\*\*  
0.26E+01!\*\*\*\*  
0.23E+01!  
0.19E+01!  
0.15E+01!  
0.12E+01!  
0.85E+00!  
0.50E+00!

-----  
1 0.50E-01! 0.20E+00!  
РАБОЧАЯ ПОДАЧА ШАГ 0.1500E-01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0.3429E+04	0.1333E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0.1976E+03	0.3086E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0.5586E-04	0.1454E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0.1704E+00	0.2449E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0.2153E+01	0.9072E+02

УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ:

ВЫЛЕТ (ММ)

80.00000

ПАРАМЕТРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ:

ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ = РАБОЧАЯ ПОДАЧА

1 - MIN= 0.50000 MAX= 4.00000

2 - MIN= 0.05000 MAX= 0.35000

ГЛУБИНА РЕЗАНИЯ ШАГ 0.3500E+00

0.36E+01!\*\*\*\*\*  
0.33E+01!\*\*\*\*\*  
0.30E+01!\*\*\*\*\*  
0.26E+01!  
0.23E+01!  
0.19E+01!  
0.15E+01!  
0.12E+01!  
0.85E+00!  
0.50E+00!

-----  
1 0.50E-01! 0.20E+00!  
РАБОЧАЯ ПОДАЧА ШАГ 0.1500E-01

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЖЕСТКОСТИ.....	0.4883E+04	0.1500E+08
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ.....	0.2357E+03	0.3273E+03
ПАРАМЕТРЫ ДЕМПИРОВАНИЯ.....	0.6666E-04	0.1542E+00
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ Р.....	0.1704E+00	0.2449E+02
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	0.2153E+01	0.9072E+02

РЕСТАВРАЦИЯ НА ОТЕ ПЛАНЕ

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ПЕРЕЧЕНЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

## ПЕРЕЧЕНЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

№	Наименование	Заводской №	Технические данные
1	Динамометр сжатия	883	Грузоподъемн. 30 кН
2	Индикатор рычажно-стрелочный	33028 45831	Цена деления 0,01 мм
3	Осциллограф свето-лучевой	7915	Скорость протяжки 0,5 мм/с - 5 м/с
4	Гальванометры тип М005 М005 М005 М004 М004 М004 М004 М004 М004 М004	445117 371147 282955 396871 528365 489332 294283 541224 265217	Собств. частота 300 Гц 300 Гц 300 Гц 600 Гц 600 Гц 600 Гц 600 Гц 600 Гц 1200 Гц 1200 Гц
5	Тензоусилитель ТА-5	690	
6	Измерительная аппаратура	6056	
7	Стабилизированный блок питания БП	4123	24 В
8	Блок миллиамперметров	54842	0 - 300 мА
9	Датчики перемещений тип ДП-3 ДП-2	428 431 374 382 391	Диапазон: 0 - 8 мм 0 - 8 мм

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

РАСЧЕТ КАПИТАЛЬНЫХ ВЛОЖЕНИЙ И  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕБЕСТОИМОСТИ  
ОБРАБОТКИ ПРОФИЛЬНОЙ ЧАСТИ  
ТУРБИННОЙ ЛОПАТКИ

Файл исходных данных для расчета удельных себестоимости  
и капитальных вложений (станок Форест-ЧПУ)

FOREST							
926670.	4015.	0.85	24.	0.	3.5	125.	
0.07	1.3	1.12	1.0	1.14	5.4	22.	
15.	3450.	1.4	65.6	0.	16.9	0.	
0.7	15.6	0.9	0.7	1.05	0.02	0.85	
125.	1.5	1.0	2.25	1.5	3.6	3.5	
10.0	45.	54.	0.15	1200.	4015.	0.85	
0.3	0.2	12.	2.5	5.	125.	10.2	
4.55	0.4	1.16	1.14	1.0	0.35	0.666	
0.	0.	0.85	1.0	1.3	1.0	5.4	
0.0	0.25	45.	0.91	1.3	1.16	1.14	
1.0	100.	4015.	0.	1.3	1.0	3.5	

## МОДЕЛЬ СТАНКА - FOREST

452.651	5.128	0.002	0.003	1.458	156.440	76.500
176.191	0.086	0.005	1.544	459.323	459.328	
1.114	0.585	0.008	0.005	3.125	11.725	0.481
109.000	0.054	0.029	1.388	0.007	0.000	0.000

## ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ДАННЫЕ (ВАРИАНТ 1)

УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ЗАТОЧНОМ СТАНОК, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА I-ГО ТИПОРАЗМЕРА (НА 1 МИН. ЧИСТОГО РЕЗАНИЯ ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ).....	0.0023
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ЗДАНИЕ, ЗАНИМАЕМОЕ ЗАТОЧНЫМ СТАНКОМ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА I-ГО ТИПОРАЗМЕРА (НА 1 МИН. ЧИСТОГО РЕЗАНИЯ ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ).....	0.0029
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ОСНОВНЫЕ СРЕДСТВА, ЗАКРЕПЛЕННЫЕ ЗА РАБОЧИМ МЕСТОМ ЗАТОЧНИКА.....	0.0052
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. ЕГО СТОЙКОСТИ.....	1.4583
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ПРИСПОСОБЛЕНИЯ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	0.0060
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ДОРОГОСТОЯЩУЮ ОСНАСТКУ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ I-ОЙ ОПЕРАЦИИ.....	1.5444
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	452.6506
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ЗДАНИЕ, ЗАНИМАЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕМ ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	5.1278
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ I-ОЙ ОПЕРАЦИИ.....	459.3228
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ОСНОВНЫЕ СРЕДСТВА СТАНОЧНИКА И ЗАТОЧНИКА, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	459.3280
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА РЕМОНТ И ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ЧПУ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	0.0083
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА СИЛОВУЮ ЭЛ. ЭНЕРГИЮ, ПРИХОДЯЩУЮСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	0.0046
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА ВОСПОМАГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	0.0536
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ПРИМЕНЯЕМЫЕ В БАЗИСНОМ И НОВОМ ВАРИАНТАХ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	0.0287
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. ЕГО СТОЙКОСТИ.....	1.3879
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА ЗАР. ПЛАТУ ЗАТОЧНИКА ПРИХОДЯЩАЯСЯ НА 1 МИН. СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА.....	0.0067
УДЕЛЬНЫЕ АМОРТИЗАЦИОННЫЕ ОТЧИСЛЕНИЯ НА РЕНОВАЦИЮ ЗАТОЧНОГО СТАНКА, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА.....	0.0001
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ СВЯЗАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОМЕЩЕНИЯ ДЛЯ ЗАТОЧНОГО СТАНКА, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. СТОЙКОСТИ РЕЖ. ИНСТРУМЕНТА.....	0.0003
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАТОЧНОГО СТАНКА.....	0.0071
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ (КОП/СТ-МИН).....	28.1070
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ СВЯЗАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАТОЧНОГО СТАНКА (КОП/СТ.-МИН).....	0.0071
УДЕЛЬНАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ (КОП/ЕД).....	28.1141

## МОДЕЛЬ СТАНКА - FOREST

452.651	5.128	0.002	0.003	1.458	156.446	76.500
176.191	0.086	0.005	1.544	459.323	459.328	
1.114	0.585	0.008	0.005	3.125	11.725	0.481
109.800	0.054	0.029	1.388	0.007	0.000	0.000

## ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ДАННЫЕ (ВАРИАНТ 2)

УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ЗАТОЧНОМ СТАНОК, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА I-ГО ТИПОРАЗМЕРА (НА 1 МИН. ЧИСТОГО РЕЗАНИЯ ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ).....	0.0023
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ЗДАНИЕ, ЗАНИМАЕМОЕ ЗАТОЧНЫМ СТАНКОМ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА I-ГО ТИПОРАЗМЕРА (НА 1 МИН. ЧИСТОГО РЕЗАНИЯ ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ).....	0.0029
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ОСНОВНЫЕ СРЕДСТВА, ЗАКРЕПЛЕННЫЕ ЗА РАБОЧИМ МЕСТОМ ЗАТОЧНИКА.....	0.0052
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. ЕГО СТОЙКОСТИ.....	1.4583
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ПРИСПОСОБЛЕНИЯ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	0.0860
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ДОРОГОСТОЯЩУЮ ОСНАСТКУ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ I-ОЙ ОПЕРАЦИИ.....	1.5444
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	452.6506
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ЗДАНИЕ, ЗАНИМАЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕМ ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	5.1279
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ I-ОЙ ОПЕРАЦИИ.....	459.3228
УДЕЛЬНЫЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ОСНОВНЫЕ СРЕДСТВА СТАНОЧНИКА И ЗАТОЧНИКА, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	459.3280
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА РЕМОНТ И ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ЧПУ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	0.0083
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА СИЛОВОЮ ЭЛ. ЭНЕРГИЮ, ПРИХОДЯЩУЮСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	0.0046
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА ВОСПОМАГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	0.0536
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ПРИМЕНЯЕМЫЕ В БАЗИСНОМ И НОВОМ ВАРИАНТАХ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ СТАНКА.....	0.0287
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. ЕГО СТОЙКОСТИ.....	1.3879
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА ЗАР. ПЛАТУ ЗАТОЧНИКА ПРИХОДЯЩАЯСЯ НА 1 МИН. СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА.....	0.0067
УДЕЛЬНЫЕ АМОРТИЗАЦИОННЫЕ ОТЧИСЛЕНИЯ НА РЕНОВАЦИЮ ЗАТОЧНОГО СТАНКА, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА.....	0.0001
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ СВЯЗАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОМЕЩЕНИЯ ДЛЯ ЗАТОЧНОГО СТАНКА, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. СТОЙКОСТИ РЕЖ. ИНСТРУМЕНТА.....	0.0003
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ, ПРИХОДЯЩИЕСЯ НА 1 МИН. РАБОТЫ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАТОЧНОГО СТАНКА.....	0.0071
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ (КОП/СТ-МИН).....	28.1070
УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ СВЯЗАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАТОЧНОГО СТАНКА (КОП/СТ.-МИН).....	0.0071
УДЕЛЬНАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ (КОП/ЕД).....	28.1141



## 1 ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ ВЫВОД СТАНОК FOREST

КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ (РУБ/ГОД).....	0.2205E+06
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ (РУБ/ЕД).....	0.3374E+02
ПОЛНАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ (РУБ/ЕД).....	0.3521E+02
ПОЛНАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ (РУБ/ГОД).....	0.1408E+05
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ (ШТ/ЧАС)....	0.6000E+00
ГОДОВАЯ ПРОИЗВОД-ТЬ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ (ШТ/ГОД)...	0.2048E+04
ПРИВЕДЕННЫЕ ЗАТРАТЫ (РУБ).....	0.4685E+05

## 2 ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ ВЫВОД СТАНОК FOREST

КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ (РУБ/ГОД).....	0.1764E+06
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ (РУБ/ЕД).....	0.2699E+02
ПОЛНАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ (РУБ/ЕД).....	0.2817E+02
ПОЛНАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ (РУБ/ГОД).....	0.1127E+05
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ (ШТ/ЧАС)....	0.7500E+00
ГОДОВАЯ ПРОИЗВОД-ТЬ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ (ШТ/ГОД)...	0.2560E+04
ПРИВЕДЕННЫЕ ЗАТРАТЫ (РУБ).....	0.3772E+05

НОМЕР ВАРИАНТА..... 2

МИНИМАЛЬНЫЕ ПРИВЕДЕННЫЕ ЗАТРАТЫ  
СУММАРНЫЕ ПО ВАРИАНТУ(РУБ)..... 0.3772E+05

КАПИТАЛЬНЫЕ ВЛОЖЕНИЯ  
СУММАРНЫЕ ПО ВАРИАНТУ(РУБ/ГОД)..... 0.1764E+06

ПОЛНАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ  
СУММАРНАЯ ПО ВАРИАНТУ(РУБ/ГОД)..... 0.1127E+05

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НИР  
Завода-ВТУЗа при

А. Мартынов

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер ПО  
Турбостроения "ЛМЗ"

В.К. Глухих



## А К Т

В условиях ПО Турбостроения "ЛМЗ" проведен комплекс работ по оптимизации механической обработки лопаток турбин, в котором рассмотрены вопросы профилеобразования сложных пространственных изделий с учетом технологической наследственности обработки по схеме САПР ТП. Проведенные работы позволяют на стадии проектирования технологического процесса подобных изделий прогнозировать возможные отклонения профилей от заданных, повышать качество обработки.

Данный комплекс работ в настоящее время частично внедрен в условиях ПОТ "ЛМЗ" с годовым экономическим эффектом 27 тыс. рублей.

Начальник технологической  
лаборатории ОГТ

В.И. Иванов

Разработчики:

А.Ф. Бабошкин  
С.Ю. Иванов  
Д.В. Васильков

" УТВЕРЖДАЮ "

Проректор Завода-ВТУЗа  
при ПОТ "ЛМЗ" по научной  
работе

*Мартынов*  
3 0384

М. А. Мартынов

" УТВЕРЖДАЮ "

Главный инженер ПОТ "Ленин-  
градский металлический завод

*В. К. Глухих*  
3.08.57

В. К. Глухих

## А К Т

промышленного испытания системы программной  
адаптации фрезерования маложестких заготовок  
в цехе №11 ПОТ "Ленинградский металлический  
завод"

Комиссия в составе: председателя - начальника лопаточного произ-  
водства ПОТ "Ленинградский металлический завод" Балашова А.П., чле-  
нов комиссии - начальника цеха №11 Цепенюка Л.Я., заместителя началь-  
ника конструкторско-технологического отдела лопаточного производства  
Денисова Г.И., начальника бюро программной обработки Тухтяева М.И.,  
мастера механического участка цеха №11 Гиндина В.А., инженера-техно-  
лога первой категории Карташева А.Л., инженера-технолога второй кате-  
гории Черноштана А.А., зав. кафедрой завода-ВТУЗа проф. д.т.н. Вейца В.  
П., ассистента кафедры "Теоретическая механика" Завода-ВТУЗа Василь-  
кова Д.В., составила настоящий а к т в следующем:

1. В цехе №11 на станке **FA5 1700N** проведено фрезерование  
профильной части пяти лопаток 28-й ступени ЦНД турбины К 300-240-3  
окончательно с переменными режимами резания, рассчитанными с помощью  
системы программной адаптации по методике, предложенной в диссертаци-  
онной работе асс. Василькова Д.В. (изменение режимов осуществлялось  
вариатором скорости подачи).

2. Фрезерование осуществлялось на следующих режимах обработки:  
частота вращения фрезы 200 об/мин, что соответствовало скорости ре-  
зания 24,5 м/мин; минимальная рабочая подача 0,187 мм/зуб; макси-  
мальная подача 0,25 мм/зуб.

3. Профильная часть лопатки обработана за 69 мин, против 82 мин,  
соответствующих обработке с существующими по технологическому процес-  
су режимами. Повышение производительности, достигнутое применением  
программной адаптации, составило 119%.

4. Контроль обработанной профильной части лопаток принятыми в це-  
ховых условиях шаблонами показал, что припуск под последующую финиш-  
ную обработку вдоль продольной оси распределен равномерно и состав-  
ляет 0,2+ 0,25 мм.

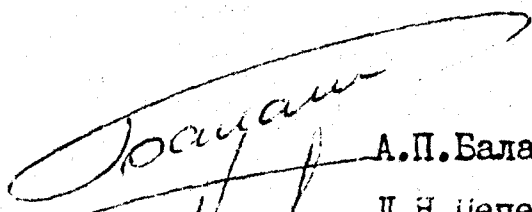
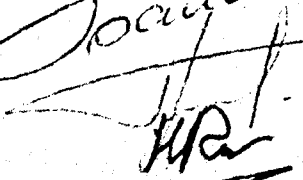


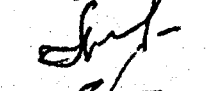
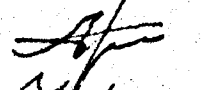
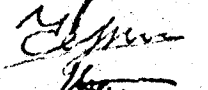
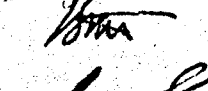

5. По результатам проведенных испытаний комиссия отмечает, что система программной адаптации фрезерования маложестких заготовок (типа турбинных лопаток), предложенная в диссертационной работе асс. Василькова Д.В., работоспособна в условиях автоматической обработки.

6. Разработанная система позволила осуществить обработку лопаток на максимальных режимах при обеспечении заданной точности профильной части лопатки.

7. На основании успешно проведенных испытаний система программной адаптации рекомендуется к внедрению для всей номенклатуры лопаток, обрабатываемых на станках с ЧПУ в цехе №11 ПОТ "Ленинградский металлургический завод".

Председатель комиссии

Члены комиссии:

	А.П.Балашов
	Л.Н.Цепенюк
	Г.И.Денисов
	М.И.Тыхтяев
	В.А.Гиндин
	А.Л.Карташев
	А.А.Черноштан
	В.Л.Вейц
	Д.В.Васильков