МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
Севастопольский приборостроительный институт

на правах рукописи

Бохонский Александр Иванович

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРУЕМЫМ СОСТОЯНИЕМ ОБЪЕКТОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Специальность: 05.13.07 - автоматизация технологических процессов и производств

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на соискание ученой степени доктора технических наук

Севастополь. 1993.

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Севастопольском приборостроительном институте.

Официальные оппоненты.

1. Доктор технических наук, старший научный сотрудник — Бачурина Майя Дмитриевна
2. Доктор технических наук, профессор — Копп Вадим Яковлевич
3. Доктор технических наук, профессор — Якубов Февзи Якубович

Ведущая организация НПО "ОРГТЕХАВТОМАТИЗАЦИЯ" (Симферополь)

Защита состоится 19 мая 1994г. в 10.00 на заседании специализированного ученого совета D 11.03.01 в Севастопольском приборостроительном институте. Адрес: 335053. Севастополь. Студгородок, Стрелецкая бухта 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Севастопольского приборостроительного института.

Автореферат разослан 1994г.

Ученый секретарь специализированного ученого совета
кандидат технических наук, доцент А.Н. Шерешевский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ. Теория оптимального управления находит применение в самых различных прикладных областях - при создании систем управления движением и виброзащиты объектов, новых технологий и машин, роботизированных технологических комплексов (РТК) механообработки и сборки. Интенсивное использование методов оптимального управления стало возможным благодаря теоретическим исследования А.Т.Барабанова, А.Г.Бутковского, А.А. Воронова, А.И.Егорова, Ю.П.Петрова, Ю.М.Почтмана, И.А.Карновского, Н.Н.Красовского, В.А.Троицкого, Р.Н.Фурунжиева и других.

Задачи компенсации перемещений и управления напряженно-деформированным состоянием твердых тел и механических систем как объектов автоматизированного производства актуальны в современной технике. Необходимость использования методов управляемого деформирования объектов возникает, например, при автоматической токарной обработке нежестких заготовок и функционировании маложестких рук манипуляторов в сборочном производстве. Чем меньше упругие перемещения заготовки, вызванные ее изгибными и крутильными деформациями в процессе обработки, тем меньше погрешности изготавливаемой детали. Актуальны дальнейшие исследования оптимального управляемого деформирования маложестких заготовок при токарной обработке и шлифовании. Манипуляторы, обеспечивая высокую точность позиционирования, должны быть экономичными в смысле снижения металлоемкости конструкций и энергозатрат на рабочие операции. Возникает потребность в совершенствовании (телескопических, антропоморфных и других конструкций) манипуляторов, в том числе с привлечение методов компенсации перемещений и управления деформируемым состоянием [59].

Прило: ние методов оптимального управления к токарной обработке широкого класса нежестких заготовок основывается на анализе трудов по теории точности обработки, оптимизации и автоматического управления в технологических процессах: Б.С.Балакшина, Б.М.Базрова, И.А.Бородачева, В.М.Кована, В.С.Корсакова, А.И.Каширина, В.В.Каминской, И.М.Колесова, В.Я.Коппа, В.А.Кудинова, З.М.Левиной, В.Г.Митрофанова, В.Н.Михелькевича, Ю.К.Новоселова, В.А.Остафьева, Д.Н.Решетова, Е.В.Пашкова, В.Т.Подпоркина, В.Н. Подураева, В.П.Суша, Ю.М.Соломенцева, А.П.Соколовского, В.А.Тараненко, М.М.Тверского, А.В.Ремова, Л.С.Ямпольского.

Постановка задач управления движением и деформированием манипуляторов базируется на анализе трудов Л.Д.Акуленко, В.Г. Градецкого, Дж.Маккарти, А.А.Кобринского, Р.Пола, Е.П.Попова, А.Е.Охоцимского, Л.Ф.Черноусько, Е.И.Юревича и других.

Улучшение технических параметров, повышение точности и надежности объектов техники основано на выявлении причин, порождающих колебания, и разработке средств борьбы с негативными последствиями динамических воздействий. Остаются актуальными задачи поиска эффективных решений пассивной и активной (управляемой) виброзащиты и защиты объектов техники от сложных динамических воздействий. Важное практическое значение имеет подавление колебаний, возникающих в процессах сборки в связи с оптимальным движением упругих систем (например, при перемещении груза с помощью маложесткой руки манипулятора).

Кроме того следует отметить, что управляемое упругое и упруго-пластическое деформирование конструкций (защита автоматизированных комплексов, объектов электроники) применимо в случае их работы в экстремальных условиях - для защиты от сложных динамических воздействий большой интенсивности (удары, взрывы,

штормы, тайфуны), в военном деле, при использовании крупногабаритных трансформируемых систем в космическом пространстве (разворачивание из транспортной укладки, управление формой, сборка конструкций с перемещением элементов без колебаний). Модели оптимального управления деформированием упругих и упругопластических объектов перспективны в различных областях современной техники [41,47,59].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ - разработка методов, создание математических моделей компенсации перемещений и управления упругим деформируемым состоянием объектов автоматизированного производства и решение поставленных задач, позволяющих в конечном счете повысить качество и производительность, снизить металлоемкость и энергоемкость промышленной продукции. Объектами исследований являются элементы (заготовки, руки манипуляторов) РТК сборки и механообработки с управляемым деформированием - управление медленным изменением положения равновесия и колебаниями (быстрым движением).

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ. Модели построены с привлечением методов теоретической и прикладной механики, теории колебаний, теории оптимального управления (вариационных методов, теории аналитического конструирования регуляторов), основ автоматизации технологических процессов и производств и робототехники; широко применяются методы моделирования, базирующиеся на аналитическом и численном эксперименте на ПЭВМ с варьированием геометрических и физических параметров объектов и воздействий.

При создании моделей компенсации перемещений и управления

упругим деформируемым состоянием твердых тел и систем поиск минимума заданного деформационного критерия качества с учетом ограничений основывался на сведении задачи об условном экстремуме к соответствующей задаче безусловного экстремума. С целью проверки результатов решения задач параллельно использовались несколько методов, реализуемых на ПЭВМ. Общность подходов в построении моделей управления объектами с различным функциональным назначением основана на использовании системы аналитических вычислений на ПЭВМ. Ключевые теоретические положения проверялись экспериментально.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Решена важная народнохозяйственная задача повышения эффективности РТК механообработки и сборки, базирующаяся на оптимальном управлении упругим деформируемым состоянием и компенсации перемещений составных элементов роботизированных модулей. С использованием обоснованных теоретически и экспериментально деформационных критериев качества (критериев оптимальности) и схем приложения управляющих силовых воздействий решены оригинальные задачи управляемого деформирования объектов (заготовок, рук манипуляторов), отражающие перспективные тенденции в современной технике. Раскрыты свойства и закономерности упругого деформирования объектов в управляемом состоянии.

В результате исследований характера вынужденных и параметрических колебаний рук манипуляторов, порождаемых оптимальными процессами перемещения грузов, впервые найдены такие законы оптимальных переносных движений упругих стержневых систем (с конечным числом степеней свободы), которые обеспечивают подавление колебаний в конечном положении для сложных дви-

жений. Автором создана информационная база технологических методов компенсации перемещений и управления упругим деформированием нежестких объектов - квазистатическим положением равновесия и колебаниями, возникающими относительно этого положения упругого деформируемого объекта.

Разработаны модели защиты от сложных динамических воздействий (в том числе - с использованием ряда нетрадиционных подходов) для объектов современной техники, представляемых как абсолютно твердые тела и как деформируемые системы.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ. Разработаны (и защищены авторскими свидетельствами) способы автоматической токарной обработки нежестких заготовок, внедрение которых обеспечивает повышение точности формы и качества поверхности при изготовлении маложестких деталей. Предложен способ управления деформируемым состоянием руки манипулятора и даны примеры рук с управляемым деформированием.

Автором созданы пакеты прикладных программ, позволяющие с использованием ПЭВМ найти управления деформациями упругих систем. Разработана процедура реализации оптимальных движений упругих манипуляторов с пневмоприводами.

Разработанный универсальный комплекс программ VIBRO для анализа статических и динамических перемещений твердых тел и систем, для расчета систем виброизоляции и защиты от сложных динамических нагрузок объектов применяется в конструкторских бюро и на предприятиях: Севастополь ("МУССОН"), Симферополь (НПО "ОРГТЕХАВТОМАТИЗАЦИЯ", "КРЫМНИИПРОЕКТ"). Экономический эффект составил более 250т.руб. на 1989г. Методические разработки по результатам исследований используются в учебном процессе.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Результаты исследований сообщались на научно-технических конференциях: профессорско-преподавательского состава Севастопольского приборостроительного института в 1978-1991г.,Всесоюзных и республиканских конференциях,проводимых обществом "Знание" Украины (РДНТП,Севастополь, 1975-1991);"Технологические пути повышения качества в машиностроении и приборостроении"(Ереван, 1982),"Пути повышения производительности и качества механообработки на машиностроительных предприятиях Урала"(Свердловк, 1982),"Прогрессивная технология в приборостроении"(Ленинград,1982),семинаре кафедры теоретической механики ЛКИ (Ленинград,1989), на конференции "Робототехника в сборочном производстве"(Севастополь, 1988), "Надежность и эффективность нетрадиционных систем сейсмозащиты зданий и сооружений" (Севастополь,1991), 7-м Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (Москва, 1991),семинаре кафедры технической кибернетики Севастопольского приборостроительного института (Севастополь,1992).

Основное содержание работы доложено на научных семинарах: Севастопольского военно-морского института (Севастополь, 1992), кафедры технической механики Севастопольского приборостроительного института (Севастополь,1992), кафедры теоретической механики Киевского инженерно-строительного института (Киев,1993), кафедры прикладной математики Симферопольского университета (Симферополь, 1993);на региональном совещании кафедр ТММ и ТМ ,проводимом опорной кафедрой ТММ и ТМ Запорожского машиностроительного института (Севастополь,1993),на научной конференции "Динамика и прочность машиностроительных и строительных конструкций" (Севастополь,1993);на расширенном семинаре департамента автоматизации

технологических процессов и производств, на научном семинаре департамента технической кибернетики Севастопольского приборостроительного института (Севастополь,1983).

ПУБЛИКАЦИИ. По теме опубликовано 70 работ, в том числе учебное пособие и получено 6 авторских свидетельств. Основное содержание отражено в 58 публикациях, список которых дан в реферате.

ОБЬЕМ РАБОТЫ. Изложена на 443 страницах (введение, 6 глав, список литературы из 265 наименований; приложение). Содержит 211 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении: отмечена актуальность оптимального управления деформируемым состоянием обьектов в автоматизированном производстве; даны схемы РТК механообработки и сборки; обосновано направление исследований, определена цель работы, приведены критерии оптимальности, перечислены основные результаты с оценкой их научной новизны и практического значения; описана структура работы с краткой аннотацией глав.

В ПЕРВОЙ главе дано развернутое обоснование постановок задач, составляющих основное содержание диссертации, приведен анализ применения методов теории оптимального управления в технике (при моделировании автоматизированных технологических процессов и производств).

Следует отметить, что до настоящего времени продолжают оставаться актуальными задачи оптимального управления упругими перемещениями нежестких заготовок непосредственно в процессе автоматической токарной обработки .

Не нашли еще должного применения идеи управляемого деформирования в робототехнике и в других областях техники. Это обусловило необходимость постановки задач компенсации перемещений и управления перемещениями объектов техники, моделируемых как абсолютно твердые и деформируемые твердые тела или системы. Построение моделей основано на теоретических обобщениях с учетом новых существенных факторов, отражающих технологические свойства объектов в автоматизированном производстве.

Использовалась методология исследований, представленная в работах по теоретической и прикладной механике: В.А. Баженова, И.И. Блехмана, В.И. Гуляева, В.Д. Кубенко, Ю.Н. Работнова, Я.Г. Пановко, Г.С. Писаренко, С.П. Тимошенко, К.В. Фролова, А.П. Филина.

Управление деформированным состоянием твердых тел при медленно движущейся нагрузке либо изменении геометрической конфигурации объектов - новый класс задач механики, возникший из потребностей современной техники [4,6,7].

При разработке образцов новой техники возникает необходимость в универсальных моделях расчета пассивной и активной защиты деформируемых систем от сложных динамических воздействий (с учетом их реализации на современных ПЭВМ). Построение моделей основывается на изучении трудов Я.М. Айзенберга, Н.Г. Беляковского, М.Д. Генкина, И.И. Гольденблата, В.В. Гурецкого, В.С. Ильинского, М.З. Коловского, В.Б. Ларина и других.

Общая концепция исследований состоит в следующем: выявление роли упругих перемещений в процессе функционирования объектов техники - моделирование управляемого деформирования - проектирование механических исполнительных органов САУ деформациями. В моделировании автоматизированных процессов механообработки и сборки используется принцип разделения и суперпозиции оптималь-

ний управляемых движений и деформированных состояний упругих элементов, составляющих описываемую систему: управление по медленному (или быстрому) движению при изменении положения нагрузки либо геометрической конфигурации нежестких объектов, управление по быстрому движению - колебаниями, порождаемыми оптимальным перемещением упругих систем.

Основные направления и задачи исследований:

- создание моделей компенсации перемещений и управления упругим деформируемым состоянием объектов при медленном изменении их геометрической конфигурации либо положения постоянной по модулю нагрузки (управление по медленному движению);

- исследование управления колебаниями нежестких заготовок при медленно движущейся динамической нагрузке (управление по быстрому движению);

- исследование колебаний упругих систем в оптимальном переносном движении и поиск таких законов движений, которые обеспечивают гашение колебаний упругого исполнительного органа(ИО) в конечном положении; реализация оптимальных движений груза с помощью манипуляторов с пневмоприводами;

- построение алгоритмов расчета пассивной и активной системы защиты от сложных динамических воздействий объектов техники как абсолютно твердых и деформируемых твердых тел; исследование функционирования манипулятора на вибрирующем основании, поиск компенсирующих воздействий для устранения перемещений центра масс схвата, возникающих в связи с деформациями системы виброзащиты и элементов конструкции манипулятора;

- практическое приложение результатов исследований - управление деформациями нежестких заготовок при автоматической токарной обработке и шлифовании, брезеровании маложестких объ-

ектов, а также при управлении деформированным состоянием рук манипуляторов; разработка конструкций ИО систем автоматического управления деформациями нежестких заготовок (САУ ДНЗ); применение в коструктороских бюро разработанных комплексов программ для ПЭВМ.

ВО ВТОРОЙ главе приведены результаты исследований управления квазистатическим положением равновесия нежестких заготовок при медленно движущейся нагрузке.

Устранение линейных и угловых перемещений сечения заготовки с продольной координатой, определяющей положение силы резания в процессе обработки, обеспечивает по существу мгновенную локальную жесткость и, как следствие, снижение погрешностей обработки, обусловленных упругими изгибными и крутильными деформациями всей заготовки.

Методика решения задачи управления по медленному движению состоит в следующем. Перемещения предполагаются малыми, а нагрузка движется достаточно медленно; поэтому динамические эффекты, обусловленные ее движением, не учитываются.

Задано: напряженно-деформированное состояние объекта с учетом управляющих либо компенсирующих воздействий, например, выражение для перемещения произвольной точки $W = W(x_k, y_k, z_k, a_{cx}, a_{cy}, a_{cz}, \ldots, P_e, U_j)$, где x_k, y_k, z_k - координаты точки, a_{cx}, a_{cy}, a_{cz} - координаты внешних сил $\vec{a}_e = \vec{a}_e(t)$, $\vec{P}_e$ - внешние медленно перемещающиеся силы ($e = 1, 2, \ldots, r$), U_j - управляющие воздействия ($j = 1, 2, \ldots, n$); J - деформационный критерий качества (критерий оптимальности); ограничения в виде равенств на напряженно-деформированное состояние $\sigma_i(x_s, y_s, z_s, a_{cx}, a_{cy}, a_{cz}, P_{ex}, P_{ey}, P_{ez}, \ldots, U_j)$, где $i = 1, 2, \ldots, m$

Осуществляется поиск таких управляющих силовых воздействий (в виде сосредоточенных сил, пар сил либо их комбинаций при $V \in R^n$) для произвольного положения внешней нагрузки, которые обеспечивают минимум критерия качества с учетом ограничений.

Для круглого стержня (заготовки), испытывающего изгиб с кручением [79], алгебраический квадратичный деформационный критерий качества (критерий оптимальности):

$$J_1 = W^2(a) + \left(\frac{d}{2} W'(a)\right)^2 + \left(h \frac{d}{2} W''(a)\right)^2 + \left(\frac{d}{2} \varphi(a)\right)^2 = min,$$

где $W(a)$ - линейное перемещение сечения заготовки с координатой, определяющей положение медленно движущейся нагрузки; $W'(a)$ - угол поворота сечения в связи с изгибом ; $W''(a) \cong 1/\rho$ - кривизна изогнутой оси стержня, обусловленная всеми видами воздействий; $\varphi(a)$ - угол закручивания поперечного заготовки; d - диаметр; h - длина участка волокна на поверхности заготовки (например, ширина шлифовального круга). Данный критерий соответсвует минимуму перемещения точки на поверхности стержня. Частные случаи:

$$J_2 = W^2(a) + \left(\frac{d}{2} W'(a)\right)^2 = min,$$

$$J_3 = \{ W(a) = 0 ; \quad W'(a) = 0 ; \}.$$

Интегральный квадратичный деформационный критерий:

$$J_4 = \left(\sum_{j=1}^{n} \int_{l_j} W_j(x)\, dx \right)^2 = min.$$

Если внешняя нагрузка неподвижна, то эти критерии используются для поиска компенсирующих воздействий. Алгоритм поиска управляющих (или компенсирующих) воздействий состоит из следующих процедур: подстановка W в критерий J ; сведение задачи на условный экстремум к задаче на безусловный

$$J_*(\vec{a},\vec{P},\vec{U},\ldots)=J(\vec{a},\vec{P},\vec{U},\ldots)+\sum_{i=1}^{m}\lambda_i\sigma_i(\vec{a},\vec{P},\vec{U},\ldots);$$

определение U_j, λ_i из необходимых условий существования экстремума

$$\frac{\partial J_*}{\partial U_j}=\frac{\partial J}{\partial U_j}+\sum_{i=1}^{m}\lambda_i\frac{\partial \sigma_i}{\partial U_j}=0;$$

$$\frac{\partial J_*}{\partial \lambda_i}=\sigma_i=0; \qquad i=1,2,\ldots,m; \quad j=1,2,\ldots,n;$$

проверка достаточных условий минимума критерия (положительной определенности квадратичной формы для второго дифференциала функции многих переменных)

$$\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{s=1}^{n}\frac{\partial^2 J_*}{\partial U_k\,\partial U_s}\Delta U_k\Delta U_s>0, \quad \sigma_i(\vec{U}+\Delta\vec{U})=0; \quad i=1,2,\ldots,m.$$

Проверка достаточных условий минимума критерия оптимальности в алгоритме аналитического поиска управлений деформациями основывается на использовании матрицы Гессе, гессиан которой должен быть больше нуля.

Способы управления деформированным состоянием классифицируются: по характеру приложения управляющих силовых воздействий (сосредоточенные силы, пары сил, комбинации силовых факторов); по используемым критериям оптимальности (линейные, квадратичные алгебраические, интегральные квадратичные); по энергетическим затратам (энергоемкие, малоэнергоемкие).

При поиске перемещений твердых тел, вызванных всеми видами воздействий, используются методы механики деформируемого твердого тела: метод начальных параметров, энергетический метод (метод Ритца); элементы теории тонких пластин и цилиндрических оболочек. Примеры управлений деформированным состоя-

нием объектов и компенсации перемещений приведены в таб.1.

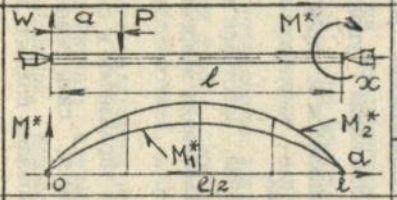
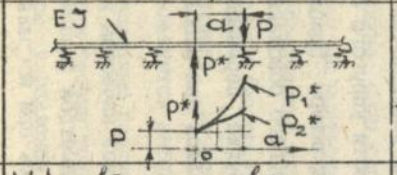
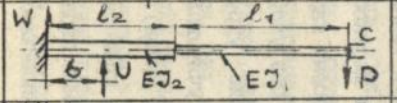
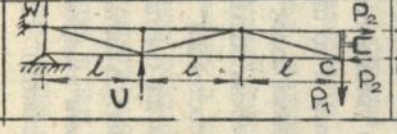
С увеличением числа управляющих силовых воздействий снимаются максимальные значения управлений, но усложняется практическая реализация - конструирование исполнительных органов САУ деформациями. Конечное число управляемых упругих опор балки рассматривается как управляемое упругое основание. Такие модели рекомендуются для использования при токарной обработке достаточно длинных нежестких валов. Построены алгоритмы поиска управлений деформациями балок бесконечной и конечной длины на упругом основании при медленно движущейся нагрузке и сосредоточенных неподвижных силовых управляющих воздействиях.

Исследован характер затухания перемещений и усилий по длине балки в управляемом состоянии, влияние изгибной жесткости и длины балки на управления; дана энергетическая оценка реализации управляемого деформирования. В связи с быстрым затуханием перемещений и усилий по длине балки возможности управления ограничены прочностью поперечного сечения. С удалением движущейся силы от точки приложения управляющего воздействия существенно возрастает расход энергии на управление. С увеличением изгибной жесткости балки уменьшаются управляющие воздействия. При уменьшении жесткости упругого основания управления уменьшаются и по своему характеру приближаются к управлениям деформациями балок без упругого основания.

Достаточно большие упругие перемещения заготовок в управляемом состоянии учитывались при использовании энергетического подхода (метод Ритца).

Чувствительность критериев качества и управлений в связи с отклонением измеряемых параметров (например, силы резания и ее координаты) оценивалась при использовании полного диффе-

Таблица I. Примеры, иллюстрирующие оптимальное управление деформированием и компенсация перемещений объектов

№№ пп	Схемы объектов, графики	Критерии	Управления, компенсирующие воздействия
I		$J_1=\left(\int_0^a W_1(x)dx\right)^2+\left(\int_a^l W_2(x)dx\right)^2=min;$	$M_1^*=Pa(-6a^8+15a^7l+2a^6l^2-30a^5l^3+18a^4l^4+8a^3l^5-8a^2l^6+l^8)/(2a^8-8a^6l^2+10a^4l^4-4a^2l^6+l^8);$
		$J_2=W(a)=0;$	$M_2^*=2Pa(l-a)/(l+a);$
2		$J_1=W^2(a)+\left(\frac{d}{2}W'(a)\right)^2=min;$	$P_1^*=\frac{Pe^{\beta a}(\sin\beta a+\cos\beta a)}{(\sin\beta a+\cos\beta a)^2+\beta^2d^2\sin^2\beta a};$
		$J_2=W(a)=0;$	$P_2^*=Pe^{\beta a}/(\sin\beta a+\cos\beta a);$
3		$W_c=0;$	$U=\frac{2PJ_2(l_1+l_2)^3}{J_1b^2[3(l_1+l_2)-b]};$
4		$W_c=0;$	$U=(3P_1(l^2+H^2)\sqrt{l^2+H^2}+6l^2(P_2H+P_1l)+3P_1l^2(H+3l)+P_1H^3)/((l^2+H^2)\sqrt{l^2+H^2}-3l^3+LH^2);$

ПРИМЕЧАНИЕ. Более сложные схемы управления деформированием (конических заготовок, дисков, рук манипуляторов и т.п.) даны в [6, 7, I7, 24, 25, 29, 32, 33, 38, 40, 47 и др.] и в диссертации.

ренциала функции многих переменных.

Найдены управления деформациями круглых дисков при медленно движущейся вдоль радиуса силе и компенсирующие воздействия для дисков с отверстиями в случае распределенной по кольцу внешней нагрузки. Поиск компенсирующих воздействий в заданном сечении для тонких цилиндрических деталей (ТЦД) осуществлялся из условия равенства нулю перемещения по направлению действия активной силы от всех воздействий (силы резания и компесирующих воздействий) с учетом условий равновесия в поперечном сечении ТЦД.

Подходы в управлении деформациями твердых тел при медленном изменении положения нагрузки распространяются и на случаи управления деформациями при изменении геометрической конфигурации механических систем, в частности - телескопических и антропоморфных конструкций рук манипуляторов. Сравнивались два пути в устранении перемещения (центра масс схвата манипулятора), обусловленного деформациями всей конструкции руки: дополнительное управляемое деформирование и поворот руки как абсолютно твердого тела. Показано, что использование приемов управления и компенсации не приводит к значительному увеличению энергетических затрат.

Поиск решения задачи на минимум массы стержневой конструкции руки манипулятора осуществлялся следующим образом: компенсирующие силовые воздействия (в виде сосредоточенных сил либо пар сил) находились из системы уравнений , включающей необходимые условия минимума критерия качества , условия равновесия узлов и ограничение на перемещение (центра масс схвата), обусловленное деформациями всей конструкции.

Управление квазистатическим положением равновесия объекта,

в связи с изменением положения нагрузки либо его геометрической конфигурации при выполнении рабочих операций исполнительными органами манипуляторов, является управлением по медленному движению (по сравнению с управлением колебаниями).

В ТРЕТЬЕЙ главе приведено исследование активного (управляемого) подавления колебаний.

Исследовано управление колебаниями объектов при неподвижной и медленно движущейся динамической нагрузке. Поиск управлений изгибными колебаниями заготовок с распределенной массой при медленно движущейся динамической нагрузке осуществлялся по алгоритму, построенному на основании теории моментов (обычно используемом в случае неподвижной динамической нагрузки): представление движущейся динамической нагрузки и неподвижных управляющих силовых воздействий в виде дельта-функций с последующим разложением по главным формам и главным координатам; подстановка полученных зависимостей в дифференциальное уравнение движения и разделение переменных; поиск ограниченного по норме управляющего воздействия, подавляющего за минимальное время колебания заготовки с координатой медленно движущейся динамической нагрузки. В случае только свободных колебаниями амплитудные значения управляющих воздействий находятся из начальных условий. При наличии в движущейся нагрузке постоянной по модулю и направлению составляющей управление представляется (в соответствии с изложенным ранее подходом) как суперпозиция управлений - по медленному движению (квазистатическим положением равновесия) и по быстрому движению (колебаниями).

Для нежесткой заготовки закрепленной в центрах преобладающей является первая мода колебаний. В этом случае, в резуль-

таге учета только первой моды колебаний, существенно упрощается алгоритм управления. При медленно перемещающемся вдоль нежесткой заготовки источнике возмущения вносится коррекция в управление, обеспечивающее непрерывное подавление колебаний.

В управляемом состоянии в месте приложения медленно движущейся динамической нагрузки образуется "узел", перемещающийся синхронно с нагрузкой. Алгоритмы предполагают также поиск управлений крутильными и продольными колебаниями заготовок. Учет случайной составляющей в медленно движущемся источнике возмущения основывается на использовании в общем алгоритме процедуры синтеза оптимальных регуляторов.

Гашение изгибных и крутильных колебаний нежестких заготовок основывается на использовании специально разработанных конструкций динамических гасителей. При разработке динамических гасителей применялась теория аналитического конструирования регуляторов. Для интегрального квадратичного критерия оптимальности, заданных линейных уравнений состояния системы "объект- гаситель" и краевых условий управление является линейной функцией фазовых координат и представляется в матричном виде $U=-\frac{1}{r}B^{T}K\mathcal{Y}$, где K - элементы симметричной матрицы констант, найденных на основании решения системы нелинейных алгебраических уравнений Риккати, B^{T} - транспонированная матрица коэффициентов. Управляемость проверялась по условию Р.Калмана, а устойчивость - по критерию Сильвестра.

Исследовано влияние уменьшения массы и падения жесткости объекта (нежесткой заготовки) на характер параметрических изгибных и крутильных колебаний. Дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами решены методом ВКБ (Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна). Показано, что подавление пара-

метрических колебаний возможно путем стабилизации жесткости объекта либо активного гашения колебаний с использованием управляемых динамических гасителей.

Исследовано гашение изгибных колебаний нежесткой заготовки с помощью демпфера, который крепится к одному из концов (рис.1). Уравнения движения:

$$\frac{d^2y_1}{dt^2}+\left[f_0+\frac{4}{ml}U(t)\right]y_1+f_1y_1^3+f_2y_1^2\frac{dy_1}{dt}=k_1P(t),$$

$$\frac{d^2z_1}{dt^2}+2n\frac{dz_1}{dt}+\omega^2z_1-t_1y_1^2-t_2y_1\frac{dy_1}{dt}=U(t),$$

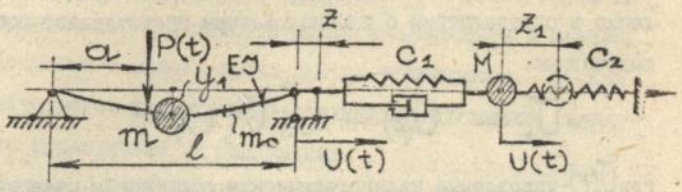
$$k_1=\delta_{12}/\delta_{11},$$

где δ_{12} – функция Грина; $\delta_{11}=l^3/48EJ$;

y_1, z_1 – обобщенные координаты; f_0, f_1, f_2, t_1, t_2 – константы, зависящие от геометрических и физических параметров системы; $U(t)$ – продольное управляющее воздействие. Коэффициент влияния вычисляется: при $\frac{l}{2}\geqslant a\geqslant 0$, $\delta_{12}=\frac{a(3l^2-4a^2)}{48EJ}$; при $l\geqslant a\geqslant\frac{l}{2}$, $\delta_{12}=\frac{4a^3-12a^2l+9al^2-l^3}{48EJ}$. Использование управления обеспечивает перевод энергии изгибных колебаний заготовки в энергию поступательных колебаний демпфера. $U(t)$ - включается в момент времени $t=0{,}1$ с и гасятся свободные колебания ($P(t)=0$) заготовки.

При исследовании колебаний руки манипулятора показано, что использование упругого соединения схвата с рукой позволят осуществлять активное гашение колебаний схвата (стабилизацию его центра масс в положении равновесия). Управление деформациями руки в связи с изменением ее конфигурации при выполнении рабочих движений рассматривается как управление по медленному движению, в то время как активное гашение колебаний соответ-

Модель заготовки с гасителем



$$m = m_0 l/2;\ 2n = k/M;\ \omega_1^2 = (C_1 + C_2)/M$$

Графики $y_1(t)$, $z_1(t)$ при $U(t) = 0$;

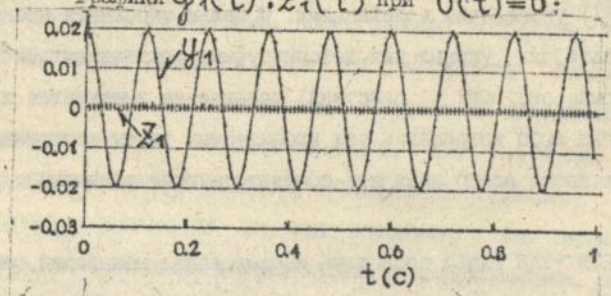
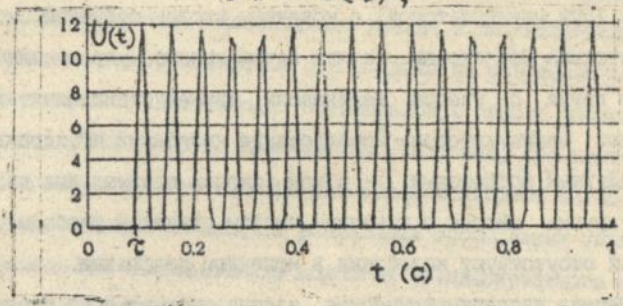


График $U(t)$;



Графики $y_1(t)$, $z_1(t)$ при $U(t) \neq 0$;

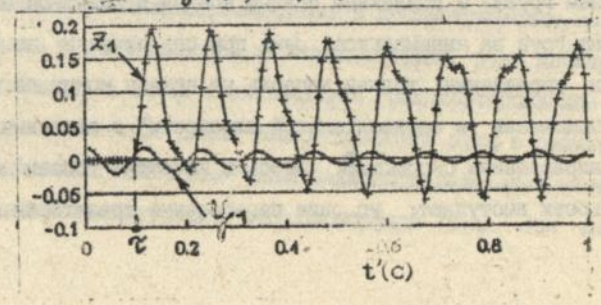


Рис. I

ствует управлению по быстрому движению. Результирующее управление в соответствии с вышеизложенным представляет собой суперпозицию:

$$\vec{U}_{*} = \vec{U}(\vec{r}) + U_s \vec{U}(t),$$

где $\vec{U}(\vec{r})$-управление квазистатическим положением равновесия (статическими деформациями); U_s - передаточная функция упругой системы; $\vec{U}(t)$-управление колебаниями. С целью упрощения практической реализации управления деформируемым состоянием рук(или поиска компенсирующих воздействий) управления выражается через перемещения либо напряжения тех характерных точек коструктуры, для которых проще всего измерить соответствующие величины.

ЧЕТВЕРТАЯ глава посвящена исследованию колебаний, возникающих при оптимальном управляемом переносном движении упругих систем (рук манипуляторов) с конечным числом степеней свободы.

Методика исследования: поиск оптимального управления движением груза с учетом реализации движения исполнительными органами манипуляторов— исследование колебаний ИО, порождаемых оптимальными процессами, — поиск законов оптимальных движений ИО (упругих систем с конечным числом степеней свободы), при которых отсутствуют колебания в конечном положении.

Решена изопериметрическая задача оптимального управления (движением груза) с подвижным правым концом в полярной системе координат. Груз за минимальное время при ограничении на норму мощности управления должен попасть на правом конце на прямую общего положения (в горизонтальной плоскости) с заданным модулем и направлением скорости. Здесь в качестве условий трансверсальности выступают: условие пересечения траектории движе-

ния груза с осью транспортера, совпадение скорости груза по модулю и направлению со скоростью ленты транспортера и равенство нулю ускорения в момент попадания на транспортер. Отличительной особенностью данной задачи является отсутствие непосредственного ограничения на управление.

Использование вариационного метода теории оптимального управления приводит к системе существенно нелинейных дифференциальных уравнений, в которых, кроме фазовых координат, неизвестными функциями времени являются множители Лагранжа. Начальные значения для множителей найдены из приближенного аналитического решения - в предположении, что траектория движения материальной точки является архимедовой спиралью.

В случае сферической системы координат поиск оптимальных силовых воздействий осуществлялся в предположении, что траектория движения центра масс схвата с грузом - отрезок прямой в пространстве. Необходимые усилия в пневмоприводах телескопических и антропоморфных рук найдены на основании соотношений теории пневмопривода. Оптимальное, в смысле быстродействия, перемещение груза реализуется, например, при помощи набора малогабаритных пневмоклапанов, устанавливаемых на корпусе пневмоцилиндра. Показано, что реализация оптимальных управлений возможна при использовании полостей предварительного наполнения и управления дросселированием.

Исследованы свободные, вынужденны и параметрические колебания звеньев телескопической и антропоморфной рук манипулятора, возникающие в связи с оптимальным транспортированием полезного груза. Изменение длины телескопической руки в результате ее выдвижения либо изменения взаимного положения звеньев (геометрической конфигурации) антропоморфной руки при опти-

мальном транспортировании груза приводят к возбуждению вынужденных и параметрических изгибных и крутильных колебаний, устранение которых рекомендуется с помощью компенсирующих воздействий.

Поиск оптимального переносного движения в сложном движении упругих систем с конечным числом степеней свободы с учетом подавления колебаний в конечном положении сводится к реализации на ПЭВМ в системе аналитических вычислений следующего алгоритма. Для заданного критерия оптимальности, краевых условий (в переносном и относительном движениях), времени переносного движения и дифференциальных уравнений относительного движения (колебаний) упругой системы в главных координатах закон оптимального переносного движения ищется в виде полинома. Коэффициенты полинома находятся на основании краевых условий и необходимых условий экстремума критерия качества. За время, кратное периоду основного тона собственных колебаний, объект (например, рука манипулятора, рис.2), в результате переносного оптимального движения, переводится из начального в конечное состояние покоя. Закон оптимального переносного движения ищется в виде полинома, коэффициенты которого определяются из системы линейных алгебраических уравнений.

В частности, на рис. 3,4 для системы с одной степенью свободы приведены графики: управления переносным движением системы из первого состояния покоя во второе, колебаний в относительном движении и изменений площадей дроссельных отверстий при наполнении соответствующих полостей из магистрали (уравнение относительного движения: $\ddot{x}+k^2x=-U(t)$, где $U(t)=a\sin^{2n+1}k_1t$ -управление на единицу массы; $a=\frac{3\pi b}{t_1^2}$, $t_1=2\pi/k_1$, $k_1=k/2$; где $n=1$). В данном примере закон изменения площа-

Динамическая модель руки манипулятора.

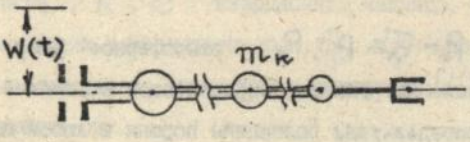


Рис.2.

Графики функций: переносного движения а,б,в; относительного движения - г; изменения площадей дроссельных отверстий-д.

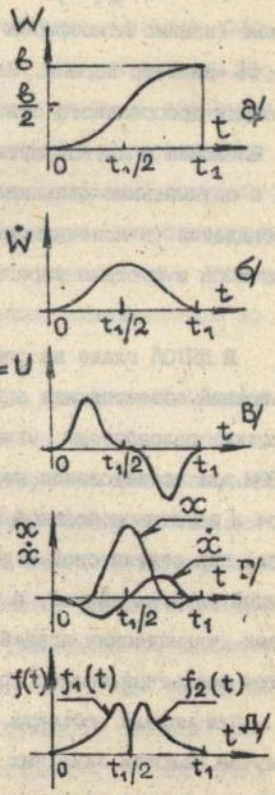


Схема оптимального переносного движения упругой руки с пневмоприводом.

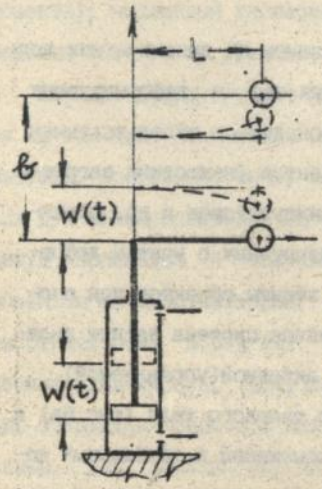


Рис.3.

Рис.4.

ди дроссельного отверстия при наполнении камеры из магистрали на первом участке движения :

$$f_1(t)=\frac{\pi S\left(\dot{P}_*(W_0+W)+\dot{W}P_*\right)}{0.006\,d^2 P_M\sqrt{1-P_*/P_M}\,RT},$$

где S – площадь поршня, $P_*=P_A+P$, P_A - атмосферное давление, W_0-начальное значение координаты, определяющей положение поршня; $W(t)$- координата, определяющая положение поршня в любой момент времени; $P_*(t)$ - давление как функция времени; $P=\frac{U}{S}$-давление (помимо атмосферного) на единицу массы перемещаемого груза; d-диаметр поршня. На участке торможения закон изменения площади дроссельного отверстия устанавливается аналогично.

Возможен и другой путь гашения колебаний, возникающих в связи с оптимальным движением упругой системы,- дозированное высвобождение (в конечном положении, с учетом фазы колебаний) запасенной в системе упругой потенциальной энергии деформации.

В ПЯТОЙ главе на основе модели защиты от динамических воздействий объектов как абсолютно твердых тел и деформируемых систем разработаны универсальные процедуры с использованием ПЭВМ для исследования перемещений объектов (нежестких заготовок и заготовок большой жесткости, манипуляторов и др. объектов) при статической и динамической нагрузках с учетом деформаций упругих связей, а также модели защиты объектов при сложных динамических воздействиях. Пассивная система защиты является составной частью при разработке активной(управляемой).

Для модели объекта как абсолютно твердого тела (рис.5а) в случае малости линейных и угловых перемещений и обобщенных координат в виде относительных перемещений центра масс и углов

поворота вокруг осей, проходящих через центр масс, линейные уравнения движения в векторно-матричном виде (6 степ. свободы):

$$M\ddot{q} + K\dot{q} + Cq = Q(t),$$

где M, K, C -инерционная матрица, матрицы линейного демпфирования и жесткости; q, $\dot{q}$, $\ddot{q}$ -матрицы-столбцы обобщенных координат, скоростей и ускорений; $Q(t)$ -матрица-столбец обобщенных сил.

Алгоритм расчета линейной системы включает следующие процедуры: реализация условий рационального монтажа - в виде системы нелинейных алгебраических уравнений; решение системы линейных алгебраических уравнений, отражающих условия попадания парциальных частот крутильных колебаний объекта в середину интервала парциальных частот поступательных колебаний; определение частот собственных колебаний, амплитуд относительных перемещений и ускорений (центра масс либо характерных точек объекта); численный эксперимент-исследование динамического поведения объекта во времени.

Влияние деформируемости объекта на его динамику оценивается на примерах стержневых моделей с конечным числом степеней свободы, соответствующих, например, конструкциям телескопических рук манипуляторов. Построены алгоритмы поиска частот, амплитуд колебаний и напряжений в опасных сечениях конструкций объектов на амортизаторах. Предусматривается расчет системы с амортизаторами и без них. Разработаны универсальные аналитические зависимости, позволяющие вычислять расчетные параметры для стержневых систем с конечным числом степеней свободы. Например, для удельных перемещений точек стержня с сосредоточенными массами и с учетом амортизаторов, расположенным по кон-

цам, справедливо (рис.5б):

$$\delta_{ij} = \delta_{ij}^{c} + \delta_{ij}^{*},$$

где $$\delta_{ij}^{c} = H^3\left(i^3j - i^3 - 3i^3jN + 3i^2N + ij^3 - 3ij^2 + \right.$$
$$+ 2ijN^2 + 2ijN - 2iN^2 - 2iN - j^3N + 3j^2N +$$
$$\left. + 2ij - 2jN^2 - 2jN + 2N^2\right)/(6(N-1)EJ);$$

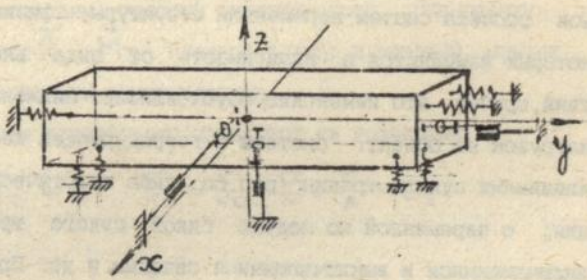
$$\delta_{ij}^{*} = \frac{N-j}{(N-1)C_1} + \left(\frac{j-1}{(N-1)C_2} - \frac{N-j}{(N-1)C_1}\right)\frac{(i-1)}{(N-1)},$$

где N - число степеней свободы ($N > 1$); H -расстояния между сосредоточенными массами; C_1, C_2 - коэффициенты жесткостей амортизаторов; EJ -изгибная жесткость стержня.

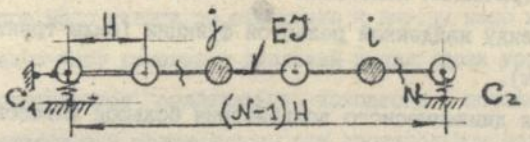
При большой жесткости объекта собственные частоты оказываются достаточно большими и система виброизоляции становится неэффективной. В этом случае спектр частот воздействия должен попадать в область между частотами объекта как абсолютно твердого дела на амортизаторах и частотами деформируемого твердого тела. При малом отличии частот системы с деформируемым объектом от частот системы виброзащиты объекта как абсолютно твердого тела виброзащита эффективна, когда частоты воздействия превосходят все частоты системы.

Защита объектов техники (систем автоматического управления, блоков радиоэлектронной аппаратуры и др.) от сложных динамических воздействий большой интенсивности предполагается трехступенчатой: упругий подвес, использование систем с целенаправленно изменяющимися в процессе воздействия динамическими свойствами, учет развития локальных пластических деформаций. Обобщения результатов исследований привели к созданию алгорит-

Динамические модели объектов (примеры)



а) абсолютно твердое тело с амортизаторами и механизмами сухого трения



б) деформируемая система с конечным числом степеней свободы

Рис. 5

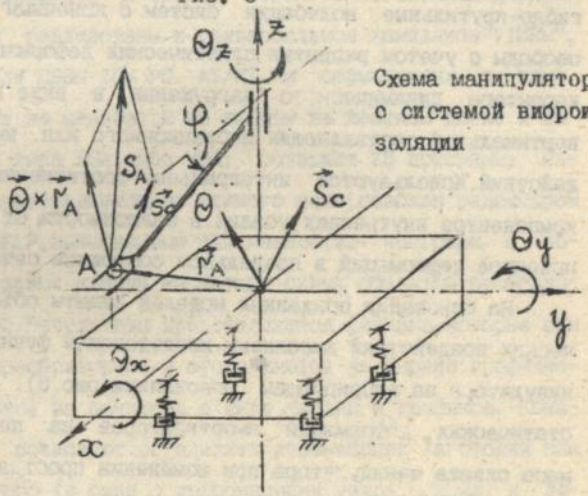


Схема манипулятора с системой виброизоляции

Рис. 6

мов расчета систем переменной структуры, физические свойства которых изменяются в зависимости от вида внешних воздействий, причем это изменение обусловливает снижение динамических нагрузок на объект: системы с деградирующей жесткостью, с механизмами сухого трения (рис.Fа) либо пластического демпфирования, с переменной по модулю силой сухого трения, системы с включающимися и выключающимися связями и др. Показано, что сухое трение можно рассматривать как релейное управление, причем закон изменения во времени релейной функции в этом случае находится на основании принципа максимума. Например, развитие параметрических колебаний в системе с сухим трением оценивается по виду найденной релейной функции (силы трения как функции времени).

Для динамического воздействия большой интенсивности предполагается развитие пластических деформаций в сечениях элементов конструкций с наибольшими внутренними усилиями. Исследованы изгибно-крутильные колебания систем с конечным числом степеней свободы с учетом развития пластических деформаций при сложном характере динамического нагружения в виде горизонтальной и вертикальной составляющих вибрационного или импульсного воздействий. Используются интегральные соотношения для приращений компонентов внутренних усилий в зависимости от приращений компонентов деформаций в предельном состоянии сечения.

На основании созданных моделей защиты объектов от динамических воздействий выполнены исследования функционирования манипулятора на вибрирующем основании (рис.6). Оценка влияния статических деформаций амортизаторов на перемещения центра масс схвата манипулятора при изменении пространственного положения руки в процессе выполнения рабочих операций осуществля-

лась с использованием условий статического равновесия: $\vec{F}_c = 0$, $\vec{M}_c = 0$, где $\vec{F}_c$, $\vec{M}_c$ - главный вектор и главный момент активных сил и реакций амортизаторов.

Компенсирующие воздействия находятся из уравнений:

$$\vec{F}_c = 0, \quad \vec{M}_c = 0, \quad \vec{S}_A = \vec{S}_c + \vec{\Theta} \times \vec{r}_A = 0,$$

где $\vec{S}_A$ -перемещение центра масс схвата с полезным грузом, обусловленное изменением положения руки, $\vec{S}_c$ -перемещение центра масс манипулятора, $\vec{\Theta}$ - угол поворота вокруг оси, проходящей через центр масс, $\vec{r}_A$ - радиус-вектор, определяющий положение центра масс схвата по отношению к центру масс манипулятора. В результате изменения давлений в цилиндрах управляемых опор обеспечивается стабилизация исходного положения статического равновесия манипулятора при произвольном положении руки.

Модели виброзащиты и защиты объектов от сложных динамических нагрузок реализованы в универсальном комплексе"VIBRO", разработанном для ПЭВМ IBM PC AT/XT и совместимых с ними. Комплекс требует не менее 1.2 Мб памяти на жестком диске и наличия мониторов типа EGA либо VGA; содержит 15 программ, запуск которых осуществляется из единого меню; снабжен редактором и инструкцией HELP, вызываемыми для каждой из программ с помощью функциональных клавиш. Расчетные схемы объектов отображаются на мониторе. Результаты представляются файлами, которые при необходимости преобразуются и отображаются на экране графически либо печатаются на принтере в виде таблиц и графиков. Комплекс программ позволяют определять перемещения заготовки как абсолютно твердого (в связи с деформациями узлов станка) и де-

формируемого твердого тела ,а также перемещения манипулятора, обусловленные деформациями его элементов и системы виброзащиты.

Созданные программные продукты используются в проектных организациях и конструкторских бюро при расчетах объектов - машиностроения, приборостроения, радиоэлектроники.

В ШЕСТОЙ главе приведены результаты экспериментальных исследований и практической реализации методов управления деформируемым состоянием нежестких объектов в автоматизированном производстве.

Описан механизм образования погрешностей нежестких деталей в процессе токарной обработки. На основани экспериментальных исследований показано, что в первом приближении можно принять линейную зависимость между погрешностью и максимальным прогибом нежесткого вала (образование "бочкообразной" формы). Следовательно, для исключения погрешности, обусловленной изгибными деформациями заготовки, необходимо устранить перемещения в сечении с координатой приложения силы резания.

Для передачи на заготовку управляющих силовых воздействий использовались специальные приспособления (роликовые опоры, опорные диски, схваты манипуляторов и др.).

Выполнены экспериментальные исследования трех типов телескопических рук минимальной массы: проверка найденных теоретически компенсирующих силовых воздействий, обеспечивающих устранение перемещений центра масс схвата с грузом, обусловленных деформациями всей конструкции; исследование характера колебаний рук, возникающих при выполнении рабочих операций. Сопоставление результатов теоретических и экспериментальных

исследований подтвердили адекватность модели компенсации перемещений и вп не удовлетворительное совпадение результатов моделирования динамики исполнительных органов.

Обобщенная САУ управлений по медленному и быстрому движениям строится по типу адаптивной системы и включает: объект управления(ОУ);быстрая модель управления(БМ); медленная модель управления(ММУ);измерительное устройство(ИУ); блок измерений и преобразований воздействий(БИПВ); исполнительный орган (ИО) . Применение САУ ДНЗ связано с созданием специальных механических исполнительных органов,непосредственно реализующих управляющие силовые воздействия на заготовку. Эффективность управления деформированием маложестких заготовок как метода повышения точности и производительности токарной обработки заключается в уменьшении числа проходов и припуска на обработку, стабилизации силы резания и снижении уровня вибраций, возможности обработки на повышенных режимах, в унификации программных средств, реализующих технологические процессы.

Противоречия проектирования ИО разрешаются в результате комплексного подхода. Например, устранение значительной податливости стержневой конструкции руки минимальной массы осуществляется путем использования приемов компенсации перемещений. Для ликвидации колебаний рук,обычно возникающих в процессе оптимального транспортирования грузов, используются такие законы движений, которые обеспечивают состояние покоя руки в конечном положении. Показано, что,с целью упрощения практической реализации, управляющее воздействие на нежесткую заготовку может создаваться с использованием руки манипулятора.

Найдены законы динамического нагружения упругой системы, для которых коэффициент динамичности равен единице. Время

нагружения задавалось в долях от периода основного тона собственных колебаний упругой системы. С увеличением продолжительности интервала динамического нагружения упрощается закон нагружения. Например, для системы с одной степенью свободы выражение для динамической нагрузки (без учета изменения физических свойств упругой системы и волновых процессов) принимает вид:

$$F(t)=F_0 t^2\left(35t_1^3ct^2+420t_1^3m-84t_1^2ct^3-1680t_1^2mt+70t_1ct^4+2100t_1mt^2-20ct^5-840mt^3\right)/(t_1^7c),$$

где m, c - соответственно масса системы и коэффициент жесткости, t_1 - время динамического нагружения до уровня F_0.

Разработанные модели управления рекомендуются для использования при: создании алгоритмов управления и проектирования манипуляторов, нагружении нежесткой заготовки силой резания, при управлении подъемом грузов. На основании теории динамического нагружения упругих систем с равным единице динамическим коэффициентом разработан способ подачи режущего инструмента при врезании, исключающий динамический эффект внезапного приложения нагрузки (силы резания). Этот способ актуален для многоступенчатых нежестких валов, когда процесс обработки сопровождается многократным повторением фазы врезания.

Приведены схемы рук манипуляторов с управляемым деформированием. Показано, что создание стержневых конструкций рук минимальной массы неразрывно связано с необходимостью использования приемов компенсации перемещений центра масс схвата (с полезным грузом), вызванных деформациями руки как единого целого. Применение управления деформациями позволяет снизить массу руки без уменьшения точности позиционирования.

На защиту выносятся следующие

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

Разработана концепция моделирования управляемого упругого деформирования твердых тел и механических систем как объектов автоматизированного производства. Предложены методы управления деформациями объектов техники, основанные на суперпозиции управлений по медленному движению (квазистатическим положением равновесия) и по быстрому движению (колебаниями). Разработана методика использования компенсации перемещений объектов и управляемого деформирования в новых технологиях.

1. Обоснованы алгебраические и интегральные деформационные критерии качества и найдены управления деформированным состоянием твердых тел при медленно движущейся нагрузке. Созданы модели управления деформациями и вскрыты закономерности управляемого упругого деформирования объектов автоматизированного производства.

Дана оценка энергетических затрат, подтвердившая малую энергоемкость управляемого деформирования. Энергозатраты на реализацию управляемого деформирования нежестких заготовок более чем на порядок меньше затрат на весь процесс обработки, а при управлении деформациями рук манипуляторов— близки к случаю, когда перемещения центра масс схвата (в связи с деформациями руки) устраняются поворотом всей руки как абсолютно твердого тела.

2. Доказана эффективность управления деформациями широкого класса нежестких заготовок с целью снижения погрешностей автоматической токарной обработки, возникающей в связи с упругими изгибными и крутильными деформациями заготовки. Най-

дены управления квазистатическим положением равновесия широкого класса нежестких заготовок, в том числе типа тел вращения с фасонными поверхностями сложного профиля, а также для произвольного случая, когда изменение сечения заготовки по длине не описывается единой аналитической функцией.

Для поиска управлений колебаниями упругих объектов (заготовок) при медленно движущейся динамической нагрузке построены алгоритмы, базирующиеся на методе моментов.

3. Разработаны алгоритмы оптимального управления перемещением груза с помощью телескопических и антропоморфных манипуляторов. Дано решение характерной для РТК сборки изопериметрической задачи оптимального управления перемещением груза на плоскости (в полярной системе координат) с фиксированного положения на ленту транспортера, движущуюся с постоянной скоростью.

Найдены такие усилия в пневмоприводах манипулятора, которые (в результате управления дросселированием) обеспечивают оптимальное перемещение .

Исследованы параметрические колебания телескопических и антропоморфных упругих конструкций рук манипуляторов, возникающие в результате оптимального транспортирования грузов. Найдены законы программных движений, при которых отсутствуют колебания рук в конечном положении. Реализация оптимального переносного движения упругих рук позволяет повысить производительность манипуляторов без снижения точности позиционирования центра масс захвата. Показано, что управление дросселированием обеспечивает практическую реализацию найденных законов управляемого движения.

4. Разработана методика расчета системы виброзащиты мани-

пулятора, работающего на вибрирующем основании. Найдены компенсирующие воздействия, обеспечивающие стабилизацию квазистатического положения центра масс схвата при произвольном положении руки.

5. Получены функции динамического нагружения с равным единице динамическим коэффициентом для упругодеформируемых объектов автоматизированного производства. Данные законы нагружения рекомендуются: при врезании резца в обрабатываемую нежесткую заготовку и для использования в ра чих операциях, выполняемых манипулятором с рукой малой жесткости; при оптимальном транспортировании упругих систем.

6. Результаты исследований по компенсации перемещений и управлению деформированным состоянием отражены в авторских свидетельствах на способы управления деформациями нежестких заготовок в процессе автоматической токарной обработки, а также на конструкции механических исполнительных органов САУ ДНЗ. Управление деформациями приводит к повышению точности формы при обработке маложестких заготовок в 2-5 и более раз (по сравнению с обработкой без управления).

7. Внедрены в конструкторских бюро: универсальные комплексы программ поиска оптимальных управлений; комплекс VIBRO-расчета системы защиты объектов как абсолютно твердых и деформируемых твердых тел от динамических нагрузок (с учетом нетрадиционных методов защиты от динамических воздействий).

Подтверждена эфективность использования предложенных методов и моделей управления деформациями объектов автоматизированного производства. На основании исследований изданы методические пособия и рекомендации, используемые в учебном процессе.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В ПУБЛИКАЦИЯХ:

1.Бохонский А.И., Тараненко В.А., Ямпольский Л.С.Методика расчета упругого элемента устройства для измерения силы резания.Деп.рук. Аннотация рукописи опубл.в сб."Технология и организация производства".N1.1974.-с.23.

2.Бохонский А.И.,Васильченко А.К.,Ямпольский Л.С.Учет деформаций нежестких дисков при адаптивном управлении токарной обработкой. Автоматизация и механизация производственных процессов.Вып.16.Львов.1977.-с.17-23.

3.Бохонский А.И.,Могилевская Т.В.Построение модели управления процессом токарной обработки нежестких деталей.Сб."Приборостроение". Вып.29.Изд."Техника".К.1980.-с.8-14.

4.Бохонский А.И.,Могилевская Т.В. Исследование законов управления статическими деформациями нежестких деталей при токарной обработке.Сб."Автоматизация производственных процессов".Вып.21. Львов.1982.-с.3-10.

5.Бохонский А.И., Макухина Г.Г., Хащин Ю.А. Совершенствование конструкций приводов сборочных роботов. В сб. "Автоматизация сборочных и контрольно-регулировочных роботов в приборостроении". Вып. 5. ВНИТИПРИБОР. М. 1982. - с. 148-155.

6.Бохонский А.И.О повышении точности автоматической токарной обработки нежестких деталей. Сб."Приборостроение".Вып.34. К. 1982. - с. 53-57.

7.Бохонский А.И.Оптимальное управление в некоторых задачах механики.Сб. "Сопротивление материалов и теория сооружений".Вып.41.К.Будивельник. 1983.-с.129-132.

8 .Бохонский А.И.,Шамлиев В.К.Управление перемещениями нежестких заготовок с целью повышения точности шлифования. Изв.ВУЗОВ."Машиностроение".N8.М.1983.-с.133-136.

9 .Бохонский А.И.,Шамлиев В.К.Управление колебаниями нежесткой заготовки в процессе шлифования.Деп. в УкрНИИНТИ. 1369 Ук.-Д83. К.1983.-10с.

11.Бохонский А.И.,Рыжкова Н.П. .Управление деформациями тонких цилиндрических оболочек при токарной обработке. Приборостроение.Респ.межвед.научн.-техн. сб.,Вып.34.,К.1983.-57-63.

12.Бохонский А.И., Макухина Г.Г. Совершенствование кон-

структивных решений исполнительных органов и алгаритмов управления промышленными роботами. Материалы III Всесоюзной конференции. ч.2. Челябинск. 1983. - с. 20-21.

13.Бохонский А.И.,Васильченко А.К.Построение законов оптимального управления деформациями нежестких валов и дисков при автоматической токарной обработке.Атоматизация производственных процессов. Вып.23.,Львов,1983.с.9-14.

14.Бохонский А.И.,Мозолевская Т.В.,Рыжкова Н.П.Совершенствование модели оптимального управления деформациями нежестких заготовок при автоматической токарной обработке// Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении: Респ. межвед. науч.-техн. сб.,Вып.20.,Львов,1984.-с.13-17.

15.Бохонский А.И., Макухина Г.Т., Хащин Ю.А. Исследование колебаний руки манипулятора. В Сб. "Приборостроение". Вып. 36. К. 1984. - с. 17-32.

16.Бохонский А.И.,Горошко Е.И.Исследование демпфера колебаний нежестких валов при токарной обработке.Деп.в УкрНИИНТИ. 8309к-84.К.1984.-12с.

17.Бохонский А.И.Управление перемещениями нежестких заготовок с помощью упругих опор при автоматической токарной обработке.Изв.ВУЗОВ.Машиностроение.N7.1985.-с.125-129.

18.Бохонский А.И.,Рыжкова Н.П.Управление линейными и угловыми деформациями нежестких заготовок при токарной обработке."Станки и инструмент".N4. 1985.- с.28-29.

19.Рыжкова Н.П.,Бохонский А.И.Об уменьшении погрешностей автоматической токарной обработки нежестких деталей.Автоматизация произв. процессов в машиностроении и приборостроении: Ресмежвед. науч.-технич. сб.,Вып. 24.,Львов.1985.-с.16-21.

20.Бохонский А.И.,Еськов Н.Г.,Ломако В.М.Определение параметров вибровозбуждения бункера оборочного автомата. Приборостроение.N37.К.1985.с.26-31.

21.Бохонский А.И.,Макухина Г.Г.Задачи управления деформациями руки манипулятора. Севастоп приборост. ит.-т.- Севастополь. 1986 - 11с. Деп. в УкрНИИНТИ. 13. 02. 26. 564-Ук.86.

22.Бохонский А.И.,Макухина Г.Г.,Хащин Ю.А.Управление колебаниями охвата руки манипулятора. Севастоп. приборостроит. институт.-Севастополь. 1986.- 17с. Деп. в УкрНИИНТИ.13.02.86.

23.Бохонский А.И.,Рыжкова Н.П. Гашение колебаний при токарной обработке цилиндрических деталей// Приборостроение: Респ.

межвед. научн.-техн. сб., Вып.38., 1985.-с.32-36.

24. Бохонский А.И. Построение управлений деформациями твердых тел при медленно движущейся внешней нагрузке. Изв. ВУЗОВ. Машиностроение. N10., М. 1989.-с. 124-128.

25. Бохонский А.И. Новая модель управления деформированным состоянием нежестких валов в процессе токарной обработки и шлифования. Материалы научно-технической конференции "Прогрессивная технология обработки малежестких деталей". Тольятти. 1987.-с.17-19.

26. Бохонский А.И., Гершман Г.И. Программы расчета систем амортизации объектов на статическую и динамическую нагрузки с использованием ЭВМ. Информационный листок о передовом производственно-техническом опыте. УкрНИИНТИ и Госплан УССР. Симферополь. 1988.-4с.

27. Бохонский А.И., Макухина Г.Г. Управление деформациями антропоморфной руки манипулятора. Сб. Автоматизация производственных процессов. N27. Львов. 1988.-с.43-47.

28. Бохонский А.И., Макухина Г.Г., Фролов В.С. Исследование автоколебаний бункера сборочного автомата. Приборостроение. Респ. межвед. научно-техн. сб. Вып.40. К. 1988.-с.102-107.

29. Бохонский А.И. Задачи снижения погрешностей обработки нежестких деталей. Сб. Приборостроение. Вып.40. К. 1988.-с.24-28.

30. Бохонский А.И., Макухина Г.Г. Моделирование оптимальных движений телескопической руки манипулятора на основе пневмопривода. Вестник машиностроения. N5. М. 1989.-с.17-19

31. Бохонский А.И. Синтез оптимальных параметров системы амортизации объектов. Тезисы докладов Респ. науч. - техн. конференции "Технология и оборудование для производства витых изделий". Севастополь. 1989.- с.80-81.

32. Бохонский А.И. Деформационный критерий качества при автоматической токарной обработке. "Приборостроение". Вып.42. К. 1991. -с.17-19.

33. Бохонский А.И. Управление крутильными деформациями нежестких валов при автоматической токарной обработке. "Автоматизация производственных процессов". Вып.29. Львов. 1990.-с.95-98.

34. Бохонский А.И., Макухина Г.Г., Хацин Ю.А. Расчет и проектирование телескопических исполнительных органов манипуляторов. Киев. УМКВО. 1989.-132с.

35. Бохонский А.И., Добкалов П.М. Управление деформациями исполнительных органов манипуляторов. Проектирование механизмов и

динамика машин. Межв. сб. науч. т. МИП. М. 1989. - с. 82-86.

35. Бохонский А.И., Цобкалов П.М. Оптимальное управление перемещением груза с помощью телескотической руки манипулятора. Тезисы докл. семинара "Автоматизация контроля качества в ГПС". Севастополь. М. 1989. - с. 55-56.

37. Бохонский А.И., Балашов Г.В. Управление деформациями стержневой телескопической руки манипулятора. Автоматизация производственных поцессов в машиностроении и приборостроении. Республ. межвед. научно-технический сб. Вып. 28. Львов. 1989. - с. 102-106.

38. Бохонский А.И. Управление деформациями балок при медленно движущейся нагрузке. Сопрот. материалов и теор. сооружений. Вып. 58. К. 1991. - с. 65-67.

39. Бохонский А.И., Голяс Н.С. Синтез управления деформированным состоянием нежестких несущих конструкций при фрезеровании. Научные достижения и опыт отраслей машиностроения - народному хозяйству. Севастополь. ВНТО Маш.-ние. 1991. - с. 54-55.

40. Бохонский А.И. Управление деформированным состоянием балок и круглых дисков при медленном изменении положения нагрузки. Сопротив. материалов и т.-я сооруж. Вып. 59. К. 1991. - с. 107-110.

41. Бохонский А. И. Компенсация деформаций и управление деформированным состоянием твердых тел и систем. Аннотация докладов. 7-й Всесоюзный съезд по теор. и прикл. мех. М. 1991. - с. - 61.

42. Бохонский А.И., Вохмянин А.Н., Эдланский Е.В. Управление изгибными колебаниями стержней при медленно движущейся вибрационной нагрузке. УкрНИИНТИ. Деп. рук. 1992. - Ук. 92. - 16с.

43. Бохонский А.И., Вохмянин А.Н. Управление деформированным состоянием нежестких валов с целью снижения погрешностей автоматической токарной обработки. Известия ВУЗОВ. Машиностроение. N4-6. М. 1992. - с. 129-134.

44. Бохонский А.И., Вохмянин А.Н. Управление деформациями нежесткого конического вала при токарной обработке. Материалы научно технической конференции" Прогрессивная технология в машиностроении". Тольятти. 1992. - с. 27.

45. Бохонский А.И. Галкина Н.Г. Адаптивная система защиты приборов от вибрационных и импульсных воздействий большой интенсивности. Приборостроение. Изд. "Техника". N43. К. 1992. - с. 71-75.

46. Бохонский А.И. Новые задачи оптимального управления в механике. Научные труды факультета естественных наук. Вып. 1., Севаст. приборостр. институт. Севастополь. 1993. - с. 42-47.

47. Бохонский А.И. Исполнительные органы минимальной массы манипуляторов с управляемым деформированием при учете температурных воздействий. Материалы международной конференции по крупногабаритным космическим конструкциям. Научно-производственное объединение "Энергия", Центр программных исследований РАН и др. организации. Новгород. 1993.-с.77.

48. Бохонский А.И., Бурцев В.К., Голяс Н.С. Реализация оптимальных движений груза с помощью антропоморфного манипулятора. Науч.-техн. сб. Оп.-ция производ. проц. Севастополь. 1994.-с.62-68.

49. Бохонский А.И. Методические рекомендации для практических занятий на тему: "Управление деформированным состоянием твердых тел". ЮМУ СПИ. Севастополь. 1983.-20с.

50. Бохонский А. И., Носаль С.С. Исследование упруго-пластического демпфирования в системе защиты приборов от импульсных воздействий. Сб. "Приборостроение". Вып. 20. К. 1976.-с.47-48.

51. Бохонский А.И. Исследование поведения упруго-пластической системы при импульсном воздействии. Реф. сб. Вып. 12. М. 1978.-с.22-26.

52. Бохонский А.И. Динамическая устойчивость жесткопластической системы. Реф. сб. Вып. 1. ЦИНИС. М. 1979.-с.10-12.

48. Бохонский А.И., Килимник Л.Ш. Пространственные колебания упругопластических систем при сейсмическом воздействии. Ж. Строит. механика и расчет сооружений. N8. М. 1981.-с.33-38.

53. А.С. 948540. Способ механической обработки нож. валов. Б. N29. 1982.

54. А.С. 973240. Способ обработки нежестких деталей. Б. N42. 1982.

55. А.С. 921687. Задняя бабка токарного станка. Б. N15. 1982.

56. А.С. 1087303. Способ подачи режущего инструмента при обработке нежестких деталей. Б. N15. 1984.

57. А.С. 1085674. Способ об.-тки нежестких деталей. Б. N14. 1984.

58. А.С. 1303400. Рука манипулятора. Бюл. N14. 1987.

59. A. Bokhonsky, A. Vothmyanin. Controlled Elastic Deformation of Solid Bodies. Second International Conference on Science and Technologe "Current Problems of Fundamental Science". Section B. Automation of Production Processes and Robotics. M. 1994.

Зак. № 17 25.03.94 г., т. 100 ЮМУ СПИ