

На правах рукописи

Ключник Александр Леонидович

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ И
ОПТИМИЗАЦИЯ СТЕЛЛАЖНЫХ РОБОТОВ

01.02.06 - динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Харьков - 1992

Работа выполнена на кафедре "Автоматическое управление движением" Харьковского политехнического института

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Голоскоков Е.Г.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Воробьев Ю.С.

кандидат технических наук,
доцент Ковревский А.П.

Ведущая организация - Государственное научно-производственное
предприятие "Аметист" (г.Херсон)

Защита состоится "18" декабря 1992 года в 10⁰⁰ час.
на заседании специализированного совета Д 068.39.06 при Харьков-
ском политехническом институте (310002, г. Харьков, ГСП, ул. Фрунзе, 21)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "17" ноября 1992 года.

Ученый секретарь
специализированного совета



Бортовой В.В.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00816860 (Т)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

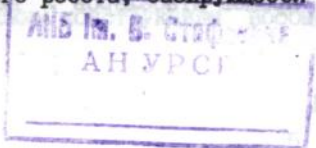
Актуальность проблемы. Условия работы современных машин, приборов и различных технических устройств во многих отраслях промышленности предъявляют очень жесткие требования к их динамическим характеристикам. Выполнение этих требований приводит к необходимости создания конструкций с наилучшими свойствами, что невозможно без разработки и использования все более совершенных методов исследований, основанных на привлечении новейших достижений в области математики, механики и средств вычислений.

Для рассматриваемых в настоящей работе стеллажных роботов характерна высокая производительность, обеспечиваемая применением приводов с высокими скоростями и ускорениями. Однако высокие требования к быстродействию, значительные динамические нагрузки в сочетании с большой высотой колонны приводят к возникновению упругих деформаций элементов конструкции и колебательных движений.

Возникновение значительных колебаний металлоконструкции (в первую очередь, колонны) в переходных процессах пуска - торможения , во-первых, ухудшает точность позиционирования, вызывает износ элементов конструкции. Во-вторых, колебания колонны уменьшают производительность робота, увеличивая длительность позиционирования для затухания колебательных процессов. Сегодняшним конструкциям стеллажных роботов свойственны такие недостатки, как низкая стабильность позиционирования, высокая материалоемкость при недостаточной высокой грузоподъемности.

Таким образом, в улучшении нуждаются как технико-экономические показатели названного класса машин (материалоемкость, надежность, долговечность), так и эксплуатационные характеристики (быстродействие, точность, грузоподъемность, энергоемкость и т.д.). В силу сказанного, исследование и решение задач динамики, управления и оптимизации стеллажных роботов и подобных им механических систем представляется актуальным.

Целью работы является развитие методов численного исследования и совершенствования поведения современных роботизированных подъемно-транспортных машин на примере комплексного рассмотрения стеллажного робота, базирующееся на:



- математическом моделировании поведения робота в процессе эксплуатации;
- оптимальном проектировании металлоконструкции стеллажного робота;
- оптимальном управлении движением стеллажного робота.

Научная новизна. Разработанный подход состоит в комплексном исследовании стеллажного робота, включающем анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкции, оптимальный выбор жесткостных и инерционных параметров основных элементов с учетом нестационарной внешней нагрузки и отыскание оптимального управления движением робота. При этом стеллажный робот на протяжении всей работы является объектом исследований, а разрабатываемые численные процедуры оптимального проектирования и оптимального управления базируются на едином подходе, заключающемся в использовании градиентного метода первого порядка. Указанное обстоятельство связано с накоплением материала, иллюстрирующего протекание численных процессов оптимизации применительно к классу исследуемых объектов, а алгоритмы открывают широкие возможности по решению задач оптимизации конструкций, подверженных динамическому воздействию, что представляет научный интерес. Количество работ по оптимальному проектированию конструкций при учете нестационарного внешнего воздействия невелико, что особенно заметно на общем фоне достаточно большого количества публикаций по проблемам оптимизации. Вместе с тем, сегодня, с одной стороны, назрела потребность в решении такого рода задач, а с другой стороны уровень развития теории оптимизации делает их решение возможным на высоком научном уровне. Сказанное определяет актуальность и научную значимость выполненных в настоящей работе исследований.

Практическая ценность проведенных исследований кроме результатов численных расчетов для конкретного стеллажного робота РС-1.0 заключается в том, что созданная математическая модель динамического поведения стеллажного робота и пакеты прикладных программ, реализующие алгоритмы оптимального проектирования и оптимального управления, могут использоваться как самостоятельно, так и служить составной частью системы автоматизированного проектирования стеллажных роботов, кранов-штабелеров, подъемников,

перегрузателей и других схожих по конструктивному исполнению подъемно-транспортных машин. Использование разработанного подхода позволяет уже на стадии проектирования выбирать рациональные жесткостные и инерционные параметры основных элементов металлоконструкции, экономичную систему формирования пуско-тормозной характеристики, способствует улучшению качественных показателей рассматриваемого класса конструкций в целом. Результаты расчетов и программы оптимального проектирования внедрены в практику проектирования Херсонского проектно-конструкторского технологического института.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались, обсуждались и были одобрены на Всесоюзных научно-технических конференциях "Вибрация и вибродиагностика. Проблемы стандартизации" (Горький, 1988г.), "Проблемы снижения материалоемкости силовых конструкций" (Горький, 1989 г.), "Прогнозирование создания гибких производственных систем и робототехнических комплексов в условиях интенсификации производства" (п.Малый Маяк Крымской области, 1990г.), "Динамика конструкций при вибрационных и сейсмических нагрузках" (Севастополь, 1991г.), XVII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ИГМаш АН Украины "Проблемы машиностроения" (Харьков, 1990г.). В полном объеме работа докладывалась на расширенном научном семинаре кафедры "Динамика и прочность машин" ХПИ.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 7 печатных работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (132 наименования), приложения и содержит 175 страниц машинописного текста, 27 рисунков, 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе на основе анализа литературных источников рассмотрено современное состояние вопросов математического моделирования, оптимального проектирования и управления применительно к механическим конструкциям вообще и к стеллажным роботам в частности.

Рассматриваемый в работе стеллажный робот представляет собой автоматически управляемую подъемно-транспортную машину циклического действия, оборудованную вертикальной колонной, по которой перемещается грузоподъемный орган. Колонна смонтирована на ходовой балке, которая перемещается по рельсовому пути, уложенному на полу между двумя рядами стеллажей. На рис.1 схематично представлен общий вид такого стеллажного робота.

Следует отметить, что в литературе встречается довольно мало публикаций, описывающих математические модели стеллажных роботов и схожих с ними по конструкции кранов-штабелеров, особенно в сравнении с аналогичными работами, посвященными таким традиционно широко используемым грузоподъемным машинам, как мостовые, козловые или порталные краны. Существующие же модели (например, широко известная двухмассовая математическая модель стеллажного крана-штабелера А.И.Зерцалова и В.И.Певзнера) во многом ограничены, не учитывают влияние упругости ходовой балки, не позволяют рассматривать режимы совмещения работы привода передвижения с работой привода подъема груза, аварийный наезд на препятствие.

Описанная ситуация во многом отражала реальный удельный вес стеллажных роботов в общем объеме производимой и используемой подъемно-транспортной техники, который имел место до сих пор. Сегодня ситуация изменилась, и в условиях работы гибких автоматизированных участков, линий и цехов автоматизированные транспортно-складские системы, в состав которых входят стеллажные роботы, становятся по существу организаторами производства. Анализ литературных источников показывает, что внимание, уделяемое созданию современных высокоэффективных стеллажных роботов является оправданным, а построение достоверных математических моделей, позволяющих проводить численные динамические исследования по усовершенствованию их эксплуатационных характеристик до уровня мировых - весьма своевременным. Теоретические основы для математического моделирования динамических процессов в деформируемых системах во многом сформировались благодаря работам И.М.Бабакова, В.В.Болотина, А.М.Боголюбова, Е.Г.Голоскокова, В.О.Конonenko, С.Н.Коженикова, Д.М.Митропольского, Я.Г.Пановко, С.П.Тимошенко, А.П.Филипова и многих др.

Естественным расширением и обобщением обычных задач механики деформируемых твердых тел, с точки зрения их места в общей проблеме проектирования и изготовления конструкций, является задача оптимального проектирования. Использование оптимального проектирования позволяет решать важные задачи снижения материалоемкости конструкций, улучшать их эксплуатационные характеристики, создавать перспективные образцы современной техники.

Огромное количество отечественных и зарубежных публикаций, посвященных различным аспектам оптимизации и оптимальному проектированию свидетельствует о постоянном развитии этой научной дисциплины и важности ее практического использования. Большой вклад в развитие теории и практики численных методов оптимизации внесли отечественные ученые Ю.Г. Евтушенко, Л.С. ПонTRYгин, Б.Н. Пшеничный, В.А. Троицкий, Н.З. Шор и многие другие. Разработке эффективных алгоритмов и программ оптимизации посвящены работы зарубежных ученых Нелдера и Мида, Пауэлла, Флетчера и Ривса, Химмельблау и др. Непосредственно оптимальному проектированию механических конструкций посвящены работы Н.В. Баничука, В.Б. Гринева и А.П. Филишова, Н. Ольхоффа, Э. Хога и Я. Ароры и др.

Вследствие специфических условий функционирования грузоподъемных машин и, в первую очередь, большого удельного веса переходных процессов в общем времени работы механизмов, весьма актуальной является задача оптимального управления их движением. В работах А.А. Зарецкого и Н.И. Портнова, А.А. Смехова и Н.И. Ерофеева, Ф.Л. Черноусько и других ставились и исследовались задачи управления грузоподъемными машинами. Задачи оптимизации как структуры, так и движения механических систем рассматривались в трудах В.Е. Бербика, А.Е. Божко, В.А. Троицкого, Ф.Л. Черноусько и др. Вопросы прикладного характера и численной реализации алгоритмов построения оптимальных решений изложены в многочисленных работах отечественных ученых Н.Н. Моисеева, Б.Т. Поляка, Б.Н. Пшеничного, Р.П. Федоренко, а также зарубежных авторов А. Брайсона и Хо Ю-ши, Э. Полака, Д. Табака и В. Куо и др.

Проведенный анализ литературных источников подтвердил актуальность и необходимость проведения намеченных исследований и позволил сформулировать цель и конкретные задачи диссертационной работы.

Во второй главе разработаны расчетные схемы и математические модели, на основе которых проведены численные исследования поведения металлоконструкции стеллажного робота при различной схематизации внешнего воздействия.

Создание статической модели продиктовано как необходимостью проверки выполнения ограничений на статическую жесткость (что связано с точностью позиционирования грузоподъемника относительно обслуживаемой ячейки), так и необходимостью определения начальных условий (начальных смещений) для проведения динамических расчетов.

Основное внимание в этой главе, в силу важности проведения динамических расчетов для создания надежных и экономичных стеллажных роботов, уделено построению динамической модели, позволяющей исследовать поведение машины в условиях переходных процессов пуска или торможения. Рассмотрены вопросы выбора рациональной степени дискретизации металлоконструкции в рамках построения математической модели. Для описания усилия, приводящего стеллажный робот в движение, используется известная зависимость $P_{дв}(\dot{x}) = \alpha(1 - \beta\dot{x})$, где α и β - константы, характеризующие конкретный привод и зависящие от его параметров (номинальной мощности электродвигателя, угла наклона механической характеристики двигателя, к.п.д. и т.д.)

Отдельно исследован вопрос о целесообразности и обоснованности использования математической модели робота с неподвижным грузоподъемником. Путем сравнения математических моделей движения стеллажного робота, одна из которых учитывает передвижение груза по колонне (рис.2), а другая предполагает его максимально поднятым (рис.3), сделан вывод о целесообразности использования второй из названных моделей. Предпосылкой для обоснования такого выбора служит разница в порядке величин скоростей движения робота и подъема груза. Кроме того, такой выбор представляется разумным в рамках компромисса между степенью подробности модели и ее простотой, а также допустимым с точки зрения учета ограничений на максимальные динамические параметры переходных процессов при решении задач оптимизации. Результирующая математическая модель представляет систему четырех дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами, зависящими от свойств системы.

Результаты проведенных в главе численных исследований показаны

ли, что выбранный в качестве конкретного объекта исследований стеллажный робот РС-1.0 удовлетворяет статическим жесткостным ограничениям, а максимальные значения динамических напряжений на всем отрезке времени выполнения технологического цикла по обслуживанию стеллажа находятся в допустимых пределах.

Вместе с тем, исследования показали, что рассматриваемая конструкция не является идеальной, и полученные результаты позволили наметить пути ее совершенствования.

В третьей главе формулируется и решается ряд задач оптимального проектирования металлоконструкции стеллажного робота.

Первым шагом является формулировка задачи оптимального выбора площадей поперечных сечений колонны и ходовой балки из условия минимума веса при статическом нагружении конструкции. Решение указанной задачи потребовало разработки численного алгоритма, основанного на методе проекции градиента. Выбор для оптимизации указанного метода обусловлен его относительно широкой известностью, ясностью логики основных этапов, хорошей алгоритмичностью. В литературе отмечается, что в основе большинства применяемых в инженерных приложениях алгоритмов, в которых используется градиент, лежит метод обобщенного приведенного градиента или метод проекции градиента. Выбор между этими двумя методами основывается на соображениях, связанных с удобством применения и простотой вычислений, причем для "сильно заполненных" задач небольшой размерности метод проекций оказывается более удобным, поскольку не требует лишних матричных вычислений, связанных с изменением разбиения переменных.

Основные шаги алгоритма состоят в задании некоторого номинального вектора переменных проектирования δ и последующем итерационном изменении вектора переменных проектирования с целью улучшения выбранного критерия качества до останова вычислений в соответствии с выполнением некоторого критерия сходимости вычислительного процесса.

Принципиально важную часть описанного алгоритма представляет отыскание влияния изменений вектора переменных проектирования на целевую функцию и ограничения. Процедура выявления указанного влияния называется анализом чувствительности и выполняется с помощью введения уравнений сопряженного состояния. Результатом проведения

анализа чувствительности является вычисление для целевой функции и каждого из нарушенных ограничений векторов

$$e^i = \frac{\partial \psi_i}{\partial b}^T - \frac{\partial h}{\partial b}^T \lambda^i, \quad (1)$$

компоненты которых задают в явном виде производную соответствующей функции (целевой или ограничения) по переменным проектирования. Здесь ψ_i - целевая функция или функция, задающая i -е ограничение; $h \equiv h(b, x)$ - уравнение состояния оптимизируемой конструкции; λ^i - сопряженная переменная, соответствующая i -му ограничению.

Улучшающая добавка к вектору переменных проектирования на основе анализа чувствительности на каждой итерации вычисляется по формуле

$$\delta b = -\eta \delta b^I + \delta b^II, \quad (2)$$

где η - величина шага по антиградиенту, $-\delta b^I$ - направление спуска для целевой функции, δb^II - величина, задающая необходимую коррекцию невязки в ограничениях.

В качестве переменных проектирования, образующих вектор b , выбраны площади поперечных сечений основных элементов металлоконструкции. Геометрическая форма поперечного сечения каждого элемента предполагается фиксированной, при этом моменты инерции и моменты сопротивления считаются заданными функциями соответствующих площадей поперечных сечений.

Построенный алгоритм позволил успешно решить статическую задачу минимизации массы металлоконструкции и послужил основой для разработки дальнейших, более глубоких, исследований по оптимальному проектированию металлоконструкции стеллажных роботов.

Следующим этапом явилось решение задач оптимального проектирования уже при учете динамических условий эксплуатации, для кото-

рых характерны интенсивные колебания металлоконструкции в переходных процессах пуска и торможения. Для решения названных задач потребовалось модифицировать использованную ранее процедуру анализа чувствительности в соответствии с вхождением времени во все определяющие зависимости - уравнения движения, уравнения сопряженного состояния, ограничения. Осуществление оптимизации в пространстве состояний системы позволило построить алгоритм с использованием уравнений динамики, а дискретизацию проводить только для численного интегрирования дифференциальных уравнений. При таком подходе наиболее трудоемким этапом является численное интегрирование дифференциальных уравнений, а не численное решение дискретных задач большой размерности, что имеет место в методах нелинейного программирования.

Уравнения движения робота приводятся к виду

$$P(\theta)\dot{z} = f(t, z, \theta),$$

$$0 \leq t \leq \tau, \quad z(0) = z^0, \quad (3)$$

где $P(\theta)$ - диагональная матрица размерности (8×8) , элементы которой зависят от переменных проектирования; $z = \{z_1, \dots, z_8\}^T$ - вектор переменных состояния (вектор обобщенных смещений и скоростей); $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}^T$ - вектор переменных проектирования (вектор площадей поперечных сечений основных элементов металлоконструкции); $f(t, z, \theta) = \{f_1, \dots, f_8\}^T$ - вектор правых частей.

Ограничения, учитываемые при проведении оптимизации, представлены в виде

$$\int_0^{\tau} \langle \varphi(t) \rangle dt = 0, \quad (4)$$

где

$$\langle \varphi(t) \rangle = \begin{cases} \varphi(t), & \varphi(t) \geq 0, \\ 0, & \varphi(t) < 0. \end{cases}$$

Легко показать, что к такому виду приводятся ограничения-неравенства вида $\varphi_i(t, z, b) \leq 0$, $0 \leq t \leq \tau$, $i = 1, \dots, m$, задающие ограничения на величины смещений элементов или значения напряжений на всем наблюдаемом отрезке времени $[0, \tau]$. Кроме указанных ограничений на динамические характеристики системы возможен учет ограничений на допустимые значения параметров проектирования, а именно

$$b_i^{\min} \leq b_i \leq b_i^{\max}, \quad (5)$$

где b_i^{\min} и b_i^{\max} - наименьшее и наибольшее из возможных значений параметров проектирования.

Векторы чувствительности, составляющие итог анализа чувствительности, в этом случае вычисляются следующим образом

$$e^i = \int_0^{\tau} \left[\frac{\partial \varphi_i}{\partial b} + \frac{\partial (P\dot{z})}{\partial b} \lambda^i - \frac{\partial f}{\partial b} \lambda^i \right] dt. \quad (6)$$

В этом выражении $\lambda^i(t) = \{\lambda_1^i, \dots, \lambda_g^i\}^T$ - вектор сопряженных переменных, соответствующий i -му нарушенному ограничению. При реализации алгоритма используется концепция ε -активных ограничений, когда на каждой итерации во внимание принимаются не только нарушенные ограничения, но и ограничения весьма близкие к нарушению (с точностью до малого положительного параметра ε). Такой прием положительно сказывается на протекании итерационного процесса оптимизации и позволяет при расчетах избежать осцилляций вблизи границы допустимой для вектора переменных проектирования b области.

Используемый выше вектор сопряженных переменных $\lambda^i(t)$ определяется при интегрировании в направлении от τ к 0 системы уравнений

$$\rho^T \dot{\lambda}^i = - \frac{\partial f^T}{\partial z} \lambda^i + \frac{\partial \varphi_i}{\partial z}, \quad (7)$$

$$\lambda^i(z) = \{0\}, \quad i = 1, \dots, m.$$

Непосредственно оптимизационная процедура выполняется на основе градиентного метода первого порядка (метода проекции градиента), который был использован уже в статической оптимизации и определяется формулой

$$b^{j+1} = b^j + \delta b, \quad (8)$$

где на каждом шаге

$$\delta b = -\eta \cdot \delta b^I + \delta b^{II}.$$

Векторы δb^I и δb^{II} соответственно параллельны и перпендикулярны гиперплоскости, касательной к допустимой области, и учитывают как направление спуска для целевой функции (функционала качества), так и необходимую коррекцию невязки в нарушенных ограничениях.

Разработанный на основе изложенного подхода алгоритм и реализующая его программа позволили решить конкретные задачи оптимального проектирования металлоконструкции стеллажного робота, выполняющего рабочие операции в процессе эксплуатации.

Первая задача представляет собой минимизацию массы металлоконструкции робота, движение которого описывается системой уравнений (3), за счет оптимального выбора площадей поперечных сечений основных элементов при выполнении в течение наблюдаемого отрезка времени ограничений на напряжения в колонне и ходовой балке,

на величину относительного смещения верхней точки колонны. Наблюдаемый отрезок времени включал разгон стеллажного робота до выхода на установившееся движение с последующим аварийным наездом на упругий концевой упор (исследования главы 2 подтвердили интуитивное представление об упругом наезде на препятствие, как о процессе наибольшего динамического нагружения металлоконструкции, что и вызвало необходимость его учета в приводимых расчетах). Протекающие численные процессы оптимизации иллюстрирует рис. 4, где представлено изменение минимизируемой функции $f_0 = \sum_{i=1}^n b_i \ell_i \rho$ и переменных проектирования в зависимости от числа выполненных итераций. Величина шага вдоль направления антиградиента выбиралась после накопления опыта в результате проведения численных экспериментов на исследуемом классе конструкций и сохранялась постоянной в течение всего итерационного процесса. Критерием останова вычислений служила близость к 0 величины $\|\delta B^T\|$ с требуемой степенью точности.

Значительное уменьшение массы металлоконструкции (оно составило 31%), выполнение всех наложенных ограничений, приемлемое время вычислений (на 1 итерацию затрачивалось около 4 с при работе на IBM PC/AT) показали достаточно высокую эффективность используемого подхода к оптимальному проектированию конструкций, испытывающих нестационарные воздействия в процессе эксплуатации. Подтверждением данного вывода является решение еще одной задачи оптимального проектирования, заключающейся в минимизации относительного смещения верхней точки колонны.

Внимание, уделяемое в работе смещению свободного конца колонны относительно основания, объясняется тем фактом, что успокоение колебаний колонны до приемлемого с точки зрения позиционирования уровня при остановке робота произойдет тем скорее, чем меньше будет максимальное значение упомянутого смещения.

В конструктивных решениях с этой целью используют различные динамические гасители (электромеханическое устройство с асинхронным двигателем, работающим на специальных характеристиках и связанным кинематически с верхним направляющим рельсом фрикционным роликом), грузовые гасители (некоторая масса, перемещающаяся по верхнему направляющему рельсу и связанная с верхней частью колонны демпфером) и т.д.

Практический интерес, вместе с тем, представляет задача выбора жесткостных и инерционных параметров колонны и ходовой балки таким образом, чтобы минимизировать максимальное значение относительного смещения конца колонны. Как и в предыдущей задаче, естественно ограничить напряжения в колонне и ходовой балке, а также наложить ограничения на массу металлоконструкции. Таким образом, речь идет об уменьшении колебаний без введения каких-либо дополнительных устройств, а лишь за счет перераспределения объема материала колонны и ходовой балки с указанной целью.

Указанная задача была сформулирована как задача выбора площадей поперечных сечений основных элементов металлоконструкции робота, движение которого описывается уравнениями (3), из условия минимума функции

$$f_0 = \max_{t \in [0, \tau]} (|Z_5 - Z_1|) \quad (9)$$

при выполнении в течение наблюдаемого отрезка времени ограничений на напряжения в колонне и ходовой балке и на величину массы. Для избежания сложности работы с функцией \max в выражении (9) был реализован подход, заключающийся во введении дополнительной переменной проектирования β_4 , имеющей смысл верхней границы значений целевой функции. При этом задача свелась к минимизации фиктивного критерия качества

$$\psi_0 = \beta_4 \quad (10)$$

при прежних ограничениях, дополненных еще одним:

$$\int_0^{\tau} \langle f_0 = \beta_4 \rangle dt = 0.$$

Величина M ^{max} выбиралась равной исходной массе металлоконструкции. Для получения решения, близкого к оптимальному, потребовалось более 100 итераций. Уменьшение критерия качества составило около 30%. Протекание численного процесса оптимизации иллюстрирует рис.5, где представлено изменение минимизируемой функции f_0 , фиктивного критерия и переменных проектирования в зависимости от числа выполненных итераций.

Для проверки достоверности полученных результатов указанные задачи оптимального проектирования решались при различных начальных значениях переменных проектирования. Во всех случаях итоговые значения переменных проектирования и целевого функционала были близки к полученным первоначально, что вместе со стремлением к 0 величины $\| \delta b^T \|$ служит подтверждением правильности полученных решений.

В четвертой главе формулируется и решается задача оптимального управления движением стеллажного робота. Алгоритм отыскания оптимального управления движением робота тесно связан с используемым на протяжении всей работы методом проекции градиента и, фактически, представляет его обобщение на случай, когда от времени зависят не только основные соотношения задачи (уравнения движения, уравнения сопряженного состояния) и переменные состояния (обобщенные перемещения и скорости), но и переменные проектирования (называемые теперь управлениями). Указанный факт сказался на таком важном этапе оптимизации, как анализ чувствительности. В силу указанной выше специфики оптимального управления по сравнению с оптимальным проектированием, векторы чувствительности перестают быть на каждом шаге оптимизационной процедуры числами, указывающими количественный и качественный вклад соответствующей переменной проектирования в изменения целевого функционала или ограничения, а становятся функциями времени. Другой особенностью задачи оптимального управления (по крайней мере, в рассматриваемой здесь постановке) является наличие условий на правом крае временного интервала и необходимость постоянного контроля за их выполнением. Корректный учет названных особенностей и составляет содержание разработки алгоритма оптимального управления стеллажным роботом в данной главе.

Алгоритм отыскания оптимального управления, заключающегося в минимизации целевого функционала

$$\psi = \Phi[z(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} L(z(t), u(t), t) dt \quad (12)$$

за счет оптимального выбора управления $u(t)$, базируется на итерационной формуле

$$u_{\text{нов.}}(t) = u_{\text{стар.}}(t) + \delta u(t), \quad (13)$$

где улучшающая добавка

$$\delta u(t) = -W^{-1} \left\{ \frac{\partial L}{\partial u} - (P + Rv)^T \frac{\partial f}{\partial u} \right\}^T \quad (14)$$

В выражение (14) входят $p(t)$ - вектор сопряженных переменных, соответствующих целевому функционалу, $R(t)$ - матрица, составленная из векторов сопряженных переменных для нарушенных ограничений, v - вектор, регулирующий уменьшение невязки в ограничениях, f - вектор правых частей уравнений движения.

Сопряженные переменные вычисляются при интегрировании из t_f в t_0 дифференциальных уравнений сопряженных состояний:

$$\dot{p} = \frac{\partial L}{\partial z}^T - \frac{\partial f}{\partial z}^T p, \quad p_j(t_f) = \begin{cases} 0, & j=1, \dots, q \\ \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z_i} \right)_{t=t_f}, & j=q+1, \dots, n \end{cases} \quad (15)$$

$$\dot{R} = - \frac{\partial f}{\partial z} R, \quad R_{ij}(t_f) = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i=j, j=1, \dots, n \end{cases} \quad (16)$$

Изложенный алгоритм был использован для решения задачи минимизации энергозатрат на управление стеллажным роботом, движение которого описывается уравнениями вида

$$\begin{aligned}\dot{z} &= f(u, z, t), \\ z(0) &= z^0\end{aligned}\quad (17)$$

за счет выбора управления $u(t)$, минимизирующего функционал

$$\psi = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} u^2 dt. \quad (18)$$

Под управлением $u(t)$ понималась скалярная величина, задающая движущее усилие привода передвижения стеллажного робота.

Рассматривались две подзадачи, охватывающие движение робота в двух различных режимах – разгон до установившегося движения и торможение до полного останова. В обоих случаях требовалось, чтобы за заданный отрезок времени робот проходил расстояние, преодолеваемое им при номинальном управлении. При этом в случае разгона дополнительно требовалось, чтобы в конечный момент времени ускорение было близким к нулю (т.е. скорость близка к установившейся), а в случае торможения задавалась равной нулю скорость движения в конечный момент времени. Эти требования были введены в условия задачи оптимизации как ограничения на названные переменные состояния в конечный момент наблюдаемых отрезков времени, а не как граничные условия на правом крае временного интервала для уравнений движения, что позволило решать задачу численного интегрирования уравнений движения как задачу Коши. В ходе вычислений контролировалась величина отклонения свободного конца колонны.

Протекание численного процесса оптимизации проиллюстрировано

на рис. 6, где изображены начальная и конечная зависимости $u(t)$ для режимов пуска и торможения, а также соответствующие им графики отклонения свободного конца колонны. Уменьшение критерия качества для случая разгона стеллажного робота составило около 17% за 45 итераций, а для случая торможения — свыше 80% за 30 итераций (что объясняется выбором далеко не самого экономичного торможения в качестве номинального).

Решение задачи оптимального управления, заключающейся в минимизации квадратичного по управлению функционала, завершило комплексное исследование поведения стеллажного робота в процессе эксплуатации, включающее в себя также анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкции и оптимальное проектирование ее основных элементов. Несмотря на то, что совершенствование поведения системы в данном случае связано не с изменением жесткостных и инерционных параметров, а с законом изменения во времени движущего усилия, разработанные процедуры численной оптимизации базируются на едином подходе, заключающемся в использовании градиентных методов первого порядка. Такой подход служит дальнейшему развитию методов совершенствования динамических конструкций, закладывая основы для комплексного решения все более сложных задач оптимизации современных машин и механизмов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Построена математическая модель, отражающая протекание в металлоконструкции стеллажных роботов переходных процессов пуска и торможения, учитывающая реальную систему управления приводом и возможность аварийного наезда на препятствие, способная, при необходимости, учесть совмещение движений, вызванное одновременной работой привода передвижения и привода подъема груза.

2. Анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкции на основе построенных математических моделей позволил сформулировать требования по улучшению технико-экономических показателей и эксплуатационных характеристик стеллажных роботов, что вылилось в постановку ряда задач оптимального проектирования

металлоконструкции и оптимального управления движением робота.

3. Разработан алгоритм оптимального проектирования механической конструкции под действием статической нагрузки применительно к классу рассматриваемых машин, реализующая этот алгоритм программа. Получено численное решение задачи минимизации массы металлоконструкции стеллажного робота под действием сил тяжести максимально поднятого полезного груза при прочностных и жесткостных ограничениях.

4. Разработан алгоритм оптимального проектирования металлоконструкции стеллажного робота, совершающего неустановившиеся колебания под действием нестационарного движущего усилия, составлена реализующая этот алгоритм программа и с ее помощью решены конкретные задачи оптимизации.

5. Разработан алгоритм отыскания закона оптимального управления движением стеллажных роботов в переходных процессах пуска и торможения, реализующая этот алгоритм программа и получено численное решение задачи минимизации энергозатрат на управление движением робота в режимах пуска и торможения, позволяющее в процессе разработки системы управления движением робота выбрать экономичную схему формирования пуско-тормозных характеристик.

6. Проведенные в работе исследования закладывают основу для качественно нового подхода к оптимизации механических конструкций, подверженных динамическим воздействиям, заключающегося в совокупной оптимизации как инерционных и жесткостных параметров системы, так и закона ее управляемого движения на базе единого математического аппарата градиентных методов первого порядка.

7. Построенные математические модели охватывают целый класс схожих по конструктивному исполнению машин, таких, как стеллажные роботы, стеллажные краны-штабелеры, различные транспортные роботы, перегружатели и т.д. Поэтому разработанные алгоритмы и программы могут служить основой для построения системы автоматизированного проектирования названного класса машин, что представляет дальнейшим развитием методов численного исследования и совершенствования современной роботизированной подъемно-транспортной техники.

1. Голоскоков Е.Г., Ключник А.Л., Пандикидис А.И., Рубашка В.П. Упрощение непрерывно-дискретной модели на основе анализа решений однородной граничной задачи // Динамика и прочность машин, 1986, Вып. 43. - С.120-125.

2. Жермунский Б.И., Рубашка В.П., Ключник А.Л. Численное моделирование динамики движения грузоподъемных машин мостового типа // Исследование оптимальных металлоконструкций и деталей подъемно-транспортных машин, 1987, С.48-54.

3. Голоскоков Е.Г., Ключник А.Л., Рубашка В.П. Оптимальное проектирование стеллажных роботов на основе математического моделирования режимов их движения // Вибрация и вибродиагностика. Проблемы стандартизации. Тез. докл. II Всесоюз. научно-техн. конф. - Горький, 1988. - С.88.

4. Ключник А.Л., Рубашка В.П. Оптимальное проектирование элементов машин при нестационарных динамических условиях эксплуатации // Проблемы снижения материалоемкости силовых конструкций. Тез. докл. II Всесоюз. конф. - Горький, 1989. - С.49-50.

5. Голоскоков Е.Г., Зайцев В.И., Ключник А.Л. Моделирование функционирования и оптимизация стеллажных роботов складского модуля // Прогнозирование создания гибких производственных систем и робототехнических комплексов в условиях интенсификации производства. Тез. докл. I Всесоюз. научно-техн. конф. - Киев, 1990. - С.91-93.

6. Ключник А.Л. Анализ динамического поведения стеллажного робота на основе его математической модели / Харьк. политехн. ин-т. - Харьков, 1990. - 9 с. - Деп. в УкрНИИТИ 18.06.90, № 1137-Укр90.

7. Голоскоков Е.Г., Ключник А.Л. Проектирование стеллажных роботов минимального веса с учетом ограничений на динамические характеристики // Динамика и прочность машин, 1991, Вып.53. - С. 22-29.

1. Лососев Е.Т., Кларк А.А., Давыдов А.А., Рыжов Е.П.
 Исследования в области автоматизации процессов управления
 технологическими процессами в металлургии. М.: Металлургиздат, 1978.
 2. Лососев Е.Т., Кларк А.А., Давыдов А.А., Рыжов Е.П.
 Автоматизация технологических процессов в металлургии. М.: Металлургиздат, 1978.
 3. Лососев Е.Т., Кларк А.А., Давыдов А.А., Рыжов Е.П.
 Автоматизация технологических процессов в металлургии. М.: Металлургиздат, 1978.

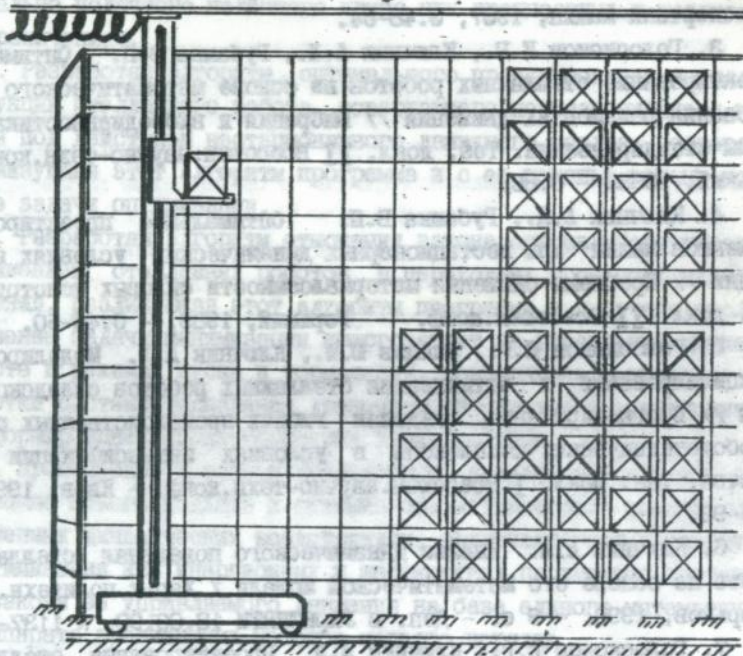


Рис. 1

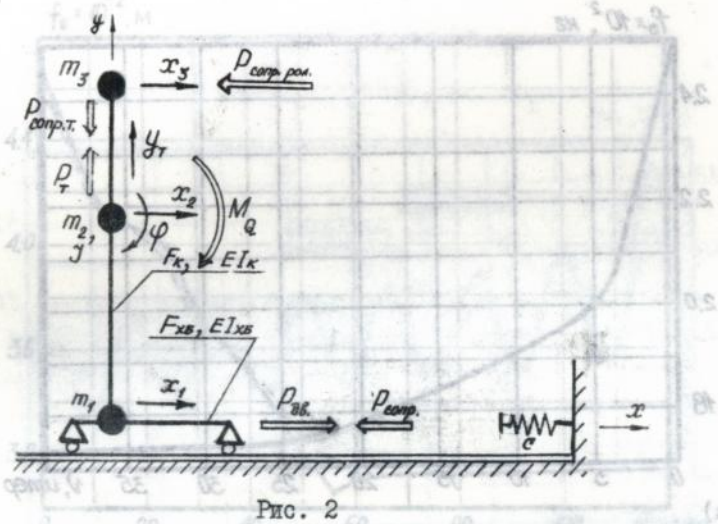


Рис. 2

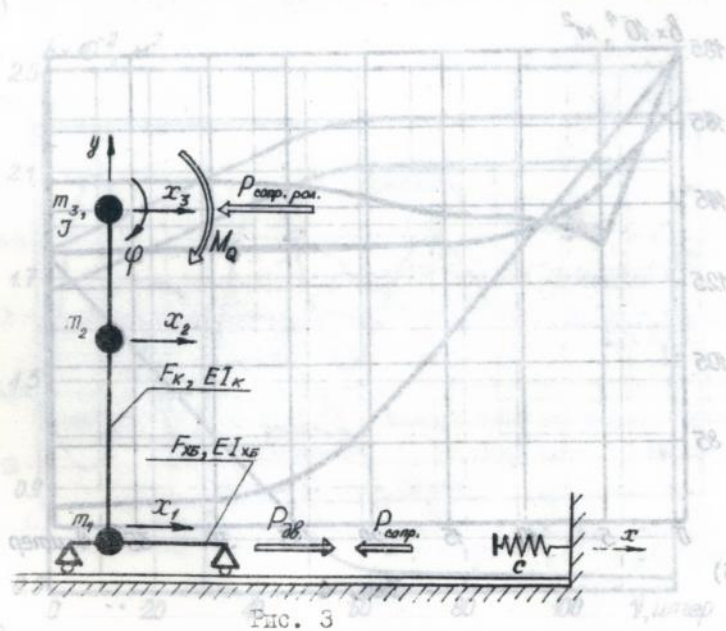
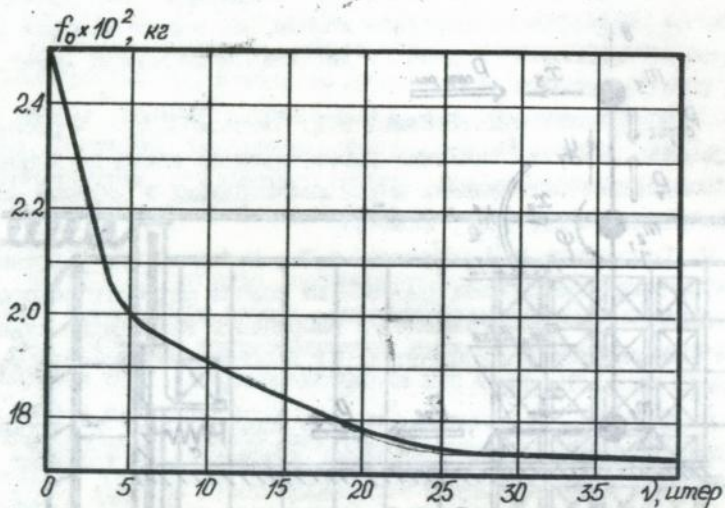
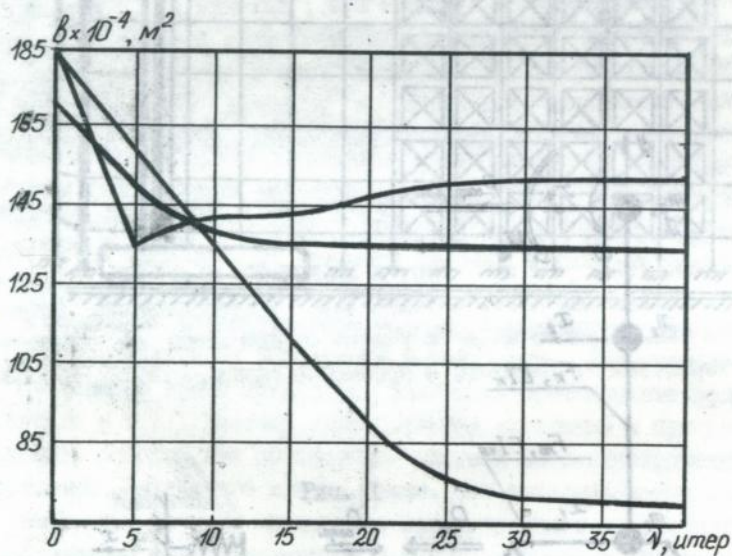


Рис. 3



а)



б)

Рис. 4

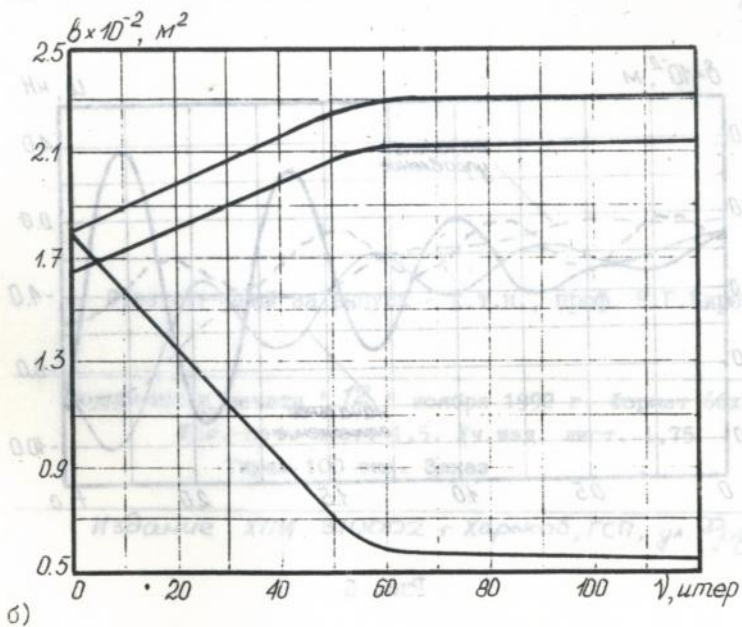
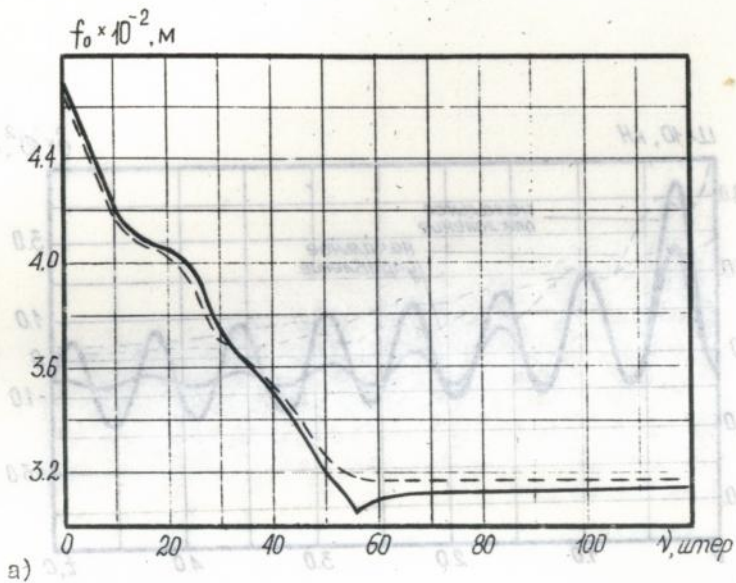


Рис. 5

469168

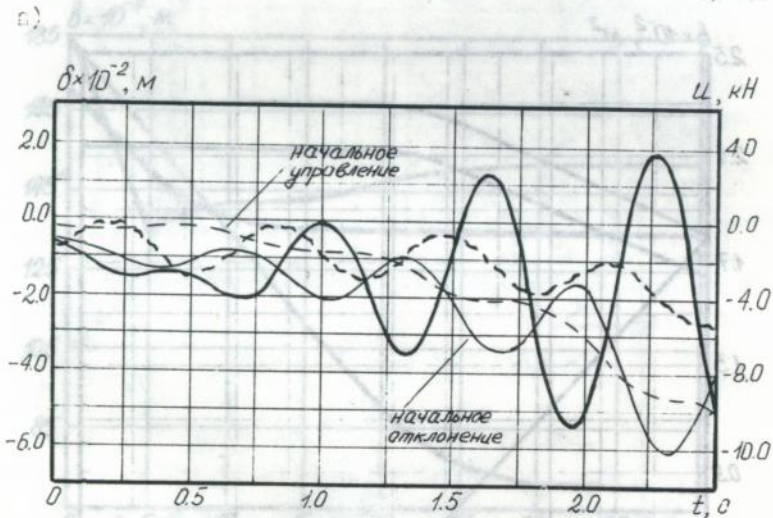
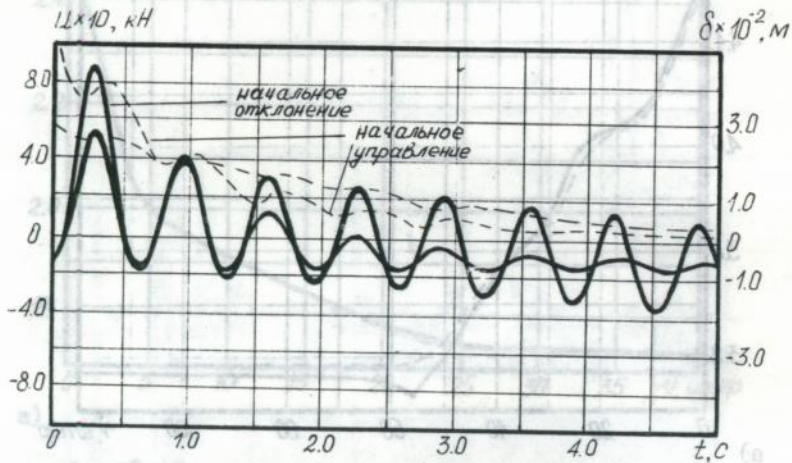


Рис. 6

Ответственный за выпуск - к.т.н., проф. Н.Г.Киреев

Подписано к печати " 12 " ноября 1992 г. Формат 60x84 1/16.

Усл.-печ. лист. 1,5. Уч.изд. лист. 1,75

Тираж 100 экз. Заказ

Издание ХПИ. 310002 г. Харьков, ГСП, ул. Фрунзе, 21.

1102/18

AB 26.251

AB 26.251