

На правах рукописи



Ткачев Сергей Михайлович

**РОБОТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНТАЖА
КРУПНОПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ**

Специальность 05.02.05 - «Роботы, мехатроника и
робототехнические системы»

Автореферат

диссертации на соискания ученой степени
кандидата технических наук

Новочеркасск - 2004

Работа выполнена в Ростовской-на-Дону государственной академии сельскохозяйственного машиностроения на кафедре "Информационные и управляющие системы".

- Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Паршин Дмитрий Яковлевич;
- Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Тугенгольд Андрей Кириллович;
кандидат технических наук, доцент
Крапивин Дмитрий Михайлович;
- Ведущая организация: Ростовский государственный строительный университет.

Защита состоится 28 декабря 2004 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д.212.304.04 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)» по адресу: 346428, г. Новочеркасск, Ростовская область, ул. Просвещения, 132, ауд. 107 глав. корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасского политехнического института).

Автореферат разослан «27» ноября 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Н.А. Глебов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Бескаркасное крупнопанельное домостроение представляет собой сложный технологический процесс, что требует применения высокопроизводительных машин и оборудования. Важнейшим направлением интенсификации строительного производства является оптимизация технологических процессов с целью снижения материальных, трудовых и энергетических затрат. Каждый этап строительства определяет в конечном итоге качество и долговечность выполняемых работ. Одним из наиболее ответственных и трудоемких этапов возведения зданий является монтаж стеновых панелей.

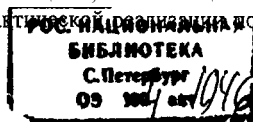
Выполнить возрастающие требования к качеству, объемам и темпам домостроения, преодолев при этом сложности монтажных работ, возможно только с применением комплексной автоматизации технологического процесса установки панели.

Вместе с тем, отсутствие эффективных способов и средств выполнения и контроля параметров технологического процесса монтажа стеновых панелей не позволяет в полной мере использовать все преимущества данного способа строительства при одновременном повышении безопасности. Решение проблемы создания роботизированного монтажного комплекса (РМК) делают тему диссертационной работы актуальной как в техническом, так и в научном плане.

Соответствие научному плану работ и целевым комплексным программам. Работа выполнена в соответствии с научным планом работ Ростовской-на-Дону государственной академии сельскохозяйственного машиностроения (РГАСХМ) в рамках научного направления «Теория и практика создания роботов, робототехнических и мехатронных комплексов».

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является повышение эффективности и безопасности выполнения монтажных операций в крупнопанельном домостроении путем совершенствования технологии на основе использования роботов и автоматизации производства монтажных работ. Для этого необходимо решить следующие основные задачи:

- 1 Исследовать технологические особенности монтажа крупнопанельных зданий, провести анализ состояния вопроса и сформулировать основные положения роботизации и автоматизации монтажных работ
- 2 Разработать принципы построения роботизированного монтажного комплекса для крупнопанельного домостроения, обосновать структурную организацию комплекса для установки стеновых панелей
- 3 Разработать и исследовать математические модели роботизированного монтажного комплекса для установки стеновых панелей, учитывающие упругие свойства механизмов, взаимовлияние оборудования комплекса и влияние внешних воздействий
- 4 Разработать методы планирования движений РМК при установке панелей и синтезировать алгоритмы управления комплексом, обеспечивающие устойчивость работы оборудования к ветровым воздействиям
- 5 Сформулировать рекомендации организациям, занимающимся разработкой новых строительных технологий, по практике внедрения полученных ре-



зультатов и использованию программных пакетов на стадии разработки и проектирования позиционирующих роботов и РМК.

Идея работы заключается в построении РМК для крупнопанельного домостроения на основе принципа раздельно-синхронного выполнения монтажных операций, с управлением, основывающимся на синергетическом подходе, двухуровневой интерполяции с последующей оптимизацией скорости движения, лежащей в основе синтеза траектории, обеспечивающей выбор ограничений в направлении максимума удельной работы.

Методы исследования. Теоретические и экспериментальные исследования, практические результаты работы основываются на методологии системного подхода, основных законах классической механики, теории и методах робототехники, методах математического анализа, методах классической и современной теории автоматического управления, методах компьютерного моделирования. Полученные результаты проверялись физическим и компьютерным моделированием, а так же полунатурными экспериментами.

В работе защищаются: структурная организация РМК для крупнопанельного домостроения; метод построения математических моделей манипуляторов с упругими связями; математические модели РМК с замкнутыми кинематическими структурами, метод планирования траектории движения манипулятора, использующий двухуровневую интерполяцию с последующей оптимизацией скорости движения, алгоритмы управления РМК с замкнутыми кинематическими структурами, обеспечивающие выбор ограничений в направлении максимума удельной работы, результаты исследований динамики позиционирующего робота и РМК; программная оболочка и пакет программных модулей для разработки и моделирования работы позиционирующих роботов и РМК; рекомендации по практической реализации позиционирующего робота, информационно-измерительной и управляющих систем

Научная новизна работы состоит в разработке:

- структурной организации РМК на основе принципа раздельно-синхронного выполнения монтажных операций, определяющего распределение функций и характер взаимодействия элементов комплекса;
- метода построения математических моделей манипуляторов с упругими связями, основанного на принципе конечных разбиений, отличающегося введением фиктивных степеней подвижности в точках критичных к деформации;
- математической модели РМК с замкнутыми кинематическими структурами, на основе использования принципов декомпозиции и малого перемещения;
- алгоритма управления РМК с замкнутыми кинематическими структурами, использующего синергетический подход для решения задачи избыточности управления;
- метода планирования траектории движения манипулятора, заключающегося в применении двухуровневой интерполяции с последующей оптимизацией скорости движения;

- алгоритма управления движением РМК с оптимизацией скорости и коррекцией траектории движения, обеспечивающей выбор ограничений в направлении максимума удельной работы.

Практическая ценность работы заключается в обосновании возможности роботизации монтажных работ в крупнопанельном строительстве, предложенной структуре построения РМК, позволяющей автоматизировать процесс установки панелей; инженерных методиках проектирования монтажных комплексов; алгоритмах управления позиционирующим манипулятором РМК; создании программного пакета, позволяющего моделировать и разрабатывать позиционирующие роботы и РМК.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивается корректным использованием фундаментальных законов физики, механики, робототехники, классической теории управления, теории электропривода, корректными допущениями при составлении математических моделей и подтверждается данными экспериментов на модели башенного крана, результатами физического и компьютерного моделирования. Расхождение результатов не превысило 6,8%

Реализация работы. Разработанные структуры, модели и методики приняты к внедрению в проектную и конструкторскую документацию ЗАО «Дон-механизация». Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе кафедрой «Информационные и управляющие системы» РГАСХМ для студентов специальности 210300 «Роботы и робототехнические системы».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 20-м международном симпозиуме «Автоматизация и механизация строительства» ISARC-2004 (г. Сеул, Южная Корея, 2004 г.), международной научно-технической конференции «Новые технологии управления движением технических объектов» (Новочеркасск, 2002 г.), международных научно-технических конференциях «Математические методы в технике и технологиях» (Тамбов, 2002 г.; Ростов-на-Дону, 2003 г.; Кострома, 2004 г.), на кафедре «Автоматизация производства, роботизация и мехатроника» (Новочеркасск, 2004), а также ежегодных научных конференциях РГАСХМ.

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 10 печ. работах, в том числе за рубежом (г. Сеул, Южная Корея) на английском языке.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем работы составляет 145 страниц машинописного текста, содержит 46 рисунков, 2 таблицы, список литературы из 93 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ методов и средств возведения крупнопанельных зданий. В результате анализа определены технологические особенности строительных процессов, наиболее трудоемкими из которых являются операции монтажного цикла. При этом решающее значение на точность выполняемых работ оказывают операции позиционирования и посадки панели на место. Обзор средств автоматизации и роботизации монтажных работ показал, что

в настоящее время отсутствуют эффективные средства автоматизации, обеспечивающие установку и ориентацию стеновых панелей. Принимая во внимание значительные массы объектов монтажа и их пространственную протяженность, указанные этапы монтажа требуют нестандартного подхода, основанного на использовании манипуляционных роботов.

Проведенный анализ методов управления манипуляторами показал, что синтез алгоритмов управления по прямым и косвенным критериям не представляется возможным в реальном времени. Задача упрощается, когда перед оптимизацией движения постулируется некоторая траектория, скорость прохождения которой рассчитывается на основании ограничений обобщенных сил. Однако, на данный момент не существует эффективных алгоритмов оптимизации траекторного движения манипуляторов, позволяющих получить замкнутое управление РМК.

Во второй главе сформулированы принципы построения РМК и предложена структура позиционирующего робота. Для выбранной структуры комплекса получено математическое описание на основании методик построения математических моделей манипуляторов с упругими связями и моделей робототехнических комплексов.

Для многоэтажных объектов автоматизация выполнения всего комплекса монтажных операций возможна на основе построения РМК, реализующего принцип раздельно-синхронного выполнения операций. Сущность принципа заключается в том, что часть монтажных операций выполняется раздельно специализированным оборудованием, а другая часть при их совместном синхронном взаимодействии. Распределение функций установки между составляющими комплекса организуется следующим образом. Кран обеспечивает перемещение панели в зону монтажа и удержание ее в процессе установки. Позиционирующий робот обеспечивает корректировку положения и точную ориентацию монтируемой детали. Структурный анализ показал целесообразность использования трехрукого манипулятора, установленного на самоходной платформе. Структурная организация РМК, реализующая описанный принцип построения, представлена на рис. 1. Ее сущность заключается в том, что система управления (СУ) верхнего уровня полностью контролирует ход установочного процесса и формирует задание силовых моментов μ_c , μ_r и кинематических параметров g_c , g_r для СУ оборудованием комплекса. Последние реализуют задание посредством локальных управлений φ_c , φ_r , с учетом информации q_c , q_r , поступающей с датчиков следящих приводов. Информационная система комплекса (ИИС) обеспечивает определение положения панели x_p на основании сигналов положения траверсы ρ_m для заданной рабочей зоны φ_m установки панели.

РМК представляет сложное взаимодействие башенного крана, панели и позиционирующего робота, поэтому в работе отдельно рассмотрены математические модели оборудования, а затем получена полная математическая модель монтажного комплекса, описывающая характер взаимодействия между ними. Особенностью моделирования работы крана и позиционирующего робота является необходимость учета упругих деформаций в их конструкциях, возникаю-



Рис. 1. Структурная схема РМК

щих при воздействии ветровых и динамических нагрузок. С этой целью разработан метод построения математических моделей упругих манипуляторов, основу которого составляет принцип конечных разбиений. На первом этапе, в результате анализа движений манипулятора определяются точки критичные к деформации, в которой упругое звено разбивается на два тела, соединенные шарниром. Введение в модель фиктивных степеней подвижности позволяет учесть упругие деформации, а добавление уравнений обобщенных сил фиктивных звеньев - силы упругости. Второй этап заключается в идентификации параметров введенных уравнений для соответствия математической модели реальному объекту.

В соответствие с предложенным методом было выяснено, что для удовлетворительной оценки кинематических параметров крана достаточно ввести наряду с тремя управляемыми обобщенными координатами q'_c семь фиктивных степеней подвижности q''_c , при этом $q_c = q'_c \cup q''_c$. В векторе q'' две первые координаты имитируют качание башни, другие две - качание троса. Для имитации свободного вращения панели на нижнем конце троса введены три вращательные степени подвижности.

Для решения обратной задачи кинематики использован численный метод решения нелинейного тригонометрического уравнения. Так как панель обычно располагается вблизи точки, относительно которой решается обратная задача, следовательно, при итерационном поиске решения вероятность попадания в локальные минимумы практически отсутствует. В этом случае обобщенная координата q'_1 определяется по формуле

$$q_{c1}^{(i+1)} = q_{c1}^{(i)} - \sum_{j=1}^3 \xi_j(q_{c1}^{(i)}) / \left. \sum_{j=1}^3 \frac{d\xi_j(q_{c1})}{dq_{c1}} \right|_{q_{c1}=q_{c1}^{(i)}}, \quad (1)$$

где $\xi_1(q_{c1}') = b_1(k_x, q_{c1}')(\tilde{x}_2(x_{co}, q_c^n) \cdot b_2(k_x, q_{c1}') - \tilde{x}_3(x_{co}, q_c^n) \cdot b_2(k_y, q_{c1}'))$;
 $\xi_2(q_{c1}') = k_x^{(4)} \sin q_{c1}' (-\tilde{x}_2(x_{co}, q_c^n) \cdot b_1(k_x, q_{c1}') + \tilde{x}_3(x_{co}, q_c^n) \cdot b_1(k_y, q_{c1}'))$;
 $\xi_3(q_{c1}') = -\tilde{x}_1(x_{co}, q_c^n)(b_1(k_y, q_{c1}') \cdot b_2(k_x, q_{c1}') - b_2(k_y, q_{c1}') \cdot b_1(k_x, q_{c1}'))$;

где $\tilde{x}_j(\cdot)$, $b_j(\cdot)$, $k_m(\cdot)$, $j = \overline{1,3}$, $m = x, y, z$ – тригонометрические функции своих аргументов. Остальные обобщенные координаты q_{c2}' , q_{c3}' определяются через заданные декартовы координаты точки крепления панели x_{co} и известные величины обобщенных координат q_c^n и q_{c1}' :

$$q_{c2}'(x_{co}, q_{c1}', q_c^n) = \frac{-\tilde{x}_2(x_{co}, q_c^n) \cdot b_1(k_x, q_{c1}') + \tilde{x}_3(x_{co}, q_c^n) \cdot b_1(k_y, q_{c1}')}{b_1(k_y, q_{c1}') \cdot b_2(k_x, q_{c1}') - b_2(k_y, q_{c1}') \cdot b_1(k_x, q_{c1}')},$$

$$q_{c3}'(x_{co}, q_{c1}', q_c^n) = \frac{\tilde{x}_2(x_{co}, q_c^n) \cdot b_2(k_x, q_{c1}') - \tilde{x}_3(x_{co}, q_c^n) \cdot b_2(k_y, q_{c1}')}{b_1(k_x, q_{c1}') \cdot b_2(k_x, q_{c1}') - b_2(k_y, q_{c1}') \cdot b_1(k_x, q_{c1}')}. \quad (2)$$

Произведя разделение на управляемые и неуправляемые обобщенные координаты, получены уравнения кинематической модели для скоростей и ускорений в виде:

$$\dot{x}_c = G_c'(\Delta x_c, q_c) \dot{q}_c + G_c^n(\Delta x_c, q_c) \dot{q}_c^n,$$

$$\ddot{x}_c = G_c'(\Delta x_c, q_c) \ddot{q}_c + G_c^n(\Delta x_c, q_c) \ddot{q}_c^n + G_c(\Delta x_c, q_c, \dot{q}_c) \dot{q}_c,$$

где $G(\Delta x, q)$ – матрица размерностью $3 \times n$ якобиана векторной функции прямой задачи кинематики $f(\Delta x, q)$ относительно точки со смещением Δx ; n – количество степеней подвижности.

Описав кинематику крана параметрами Денавита-Хартенберга и пользуясь формализмом Лагранжа, получены уравнения динамики голономной системы крана. Обобщенные моменты крана описываются зависимостью

$$M_c = D_c(q_c) \dot{q}_c + b_c(q_c, q_c) + M_{cw}, \quad (3)$$

где $D_c(q_c)$, $b_c(q_c, q_c)$ – матрица динамики и вектор кориолисовых, центробежных и гравитационных сил. Последнее слагаемое M_{cw} определяет влияние ветровой нагрузки на кран, при этом действие распределенной силы вызванной этой нагрузкой, заменено эквивалентными сосредоточенными силами, действующими на элементы крана,

$$F_w^{(k)} = (\mathcal{S}_x^{(k)}(q) P_{wx}, \mathcal{S}_y^{(k)}(q) P_{wy}, \mathcal{S}_z^{(k)}(q) P_{wz})^T,$$

где $\mathcal{S}_x^{(k)}(q)$, $\mathcal{S}_y^{(k)}(q)$, $\mathcal{S}_z^{(k)}(q)$ – функция скоростного коэффициента ветровой нагрузки k -го элемента в направлении осей абсолютной системы координат, P_{wx} , P_{wy} , P_{wz} – скорость ветра. Пусть сила $F_w^{(k,i)}$ имеет точку приложения с координатами $r_w^{(k,i)}$, измеренными в системе координат i -го звена, с которым жестко связана k -я масса. Будем считать, что параметры $r_w^{(k,i)}$ незначительно меняются в

процессе установки панели и могут быть заранее оценены. Следовательно, переход к обобщенным координатам крана будет иметь вид

$$\mathbf{M}_{c_w} = \sum_{i=1}^{l_w} \mathbf{G}_i^T(\mathbf{r}_w^{(k,i)}, \mathbf{q}) \mathbf{r}_w^{(k,i)} = \hat{\mathbf{G}}^T(\mathbf{r}, \mathbf{q}) \hat{\mathbf{r}}_w, \quad i = 2, 3, 4, 7, 10,$$

где l_w – количество тел, обладающих парусностью, связанных с i -м звеном; якобиан $\mathbf{G}_i(\Delta \mathbf{x}, \mathbf{q})$ отличается от $\mathbf{G}(\Delta \mathbf{x}, \mathbf{q})$ тем, что количество столбцов матрицы уменьшается с n до i .

Используя оператор разделения обобщенных координат крана q_c на управляемые q'_c и фиктивные q''_c , преобразуем (3) к виду

$$\begin{aligned} \mathbf{M}'_c &= D'_c(q_c) \dot{q}'_c + \check{D}'_c(q_c) \dot{q}''_c + \mathbf{b}'_c(q_c, q_c) + \mathbf{M}'_{c_w}, \\ \mathbf{M}''_c &= \check{D}''_c(q_c) \dot{q}'_c + D''_c(q_c) \dot{q}''_c + \mathbf{b}''_c(q_c, q_c) + \mathbf{M}''_{c_w}. \end{aligned} \quad (4)$$

При этом вектор \mathbf{M}' реализуется приводами крана, а обобщенные силы фиктивных степеней подвижности определяются соотношением $\mathbf{M}'' = -\alpha \mathbf{q}'' - \beta \dot{\mathbf{q}}''$, где α , β – диагональные матрицы жесткости и диссипации элементов конструкции крана. Полученная в матричном виде модель крана удобна для построения модели монтажного комплекса и алгоритмов управления.

Построение моделей манипуляторов позиционирующего робота вначале выполнено на основе рассмотрения абсолютно жесткой конструкции, а затем с учетом упругих деформаций. Их учет выполнен путем введения двух дополнительных степеней подвижности. На основании предложенной структуры кинематика манипулятора позиционирующего робота описана выражением вида

$$\mathbf{x}_{r,d}(\mathbf{q}_r) = \begin{pmatrix} \lambda \cdot \cos(q_{r1} + \varphi_{br}) - a_{r5} \sin q_{r5} \cdot \sin(q_{r1} + \varphi_{br}) + x_{br1} \\ \lambda \sin(q_{r1} + \varphi_{br}) + a_{r5} \sin q_{r5} \cdot \cos(q_{r1} + \varphi_{br}) + x_{br2} \\ \sin(q_{r2} - q_{r4}) \cos q_{r5} \cdot a_{r5} + \sin q_{r7} \cdot (q_{r3} + d_{r3}) + d_{r1} + x_{br3} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $\lambda = \cos(q_{r2} - q_{r4}) a_{r5} \cos q_{r5} + (q_{r3} + d_{r3}) \cos q_{r2} + a_{r1}$, x_{br} , φ_{br} – координаты базы манипулятора. На базе предложенной кинематической модели построена динамическая модель робота.

Особенностью построения математической модели РМК является наличие замкнутых связей в системе, поэтому модель построена в соответствии с принципами декомпозиции и малого перемещения. Оборудование комплекса декомпозируется в точки крепления манипуляторов к панели на четыре автономные механические системы, а взаимодействие между ними, учитывается по принципу малого перемещения. В этом случае силы реакции связей в точках прикрепления манипуляторов, обусловленные упругими деформациями, равны

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_i^{(k)} &= \alpha_i^{(k)} \left(\mathbf{f}_r^{(k)}(\Delta \mathbf{x}_r^{(k)}, \mathbf{q}_r^{(k)}) - \mathbf{f}_c(\Delta \mathbf{x}_c^{(k)}, \mathbf{q}_c) \right) + \\ &+ \beta_i^{(k)} \left(\mathbf{G}_r^{(k)}(\Delta \mathbf{x}_r^{(k)}, \mathbf{q}_r^{(k)}) \dot{\mathbf{q}}_r^{(k)} - \mathbf{G}_c(\Delta \mathbf{x}_c^{(k)}, \mathbf{q}_c) \dot{\mathbf{q}}_c \right), \quad k = \overline{1,3}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\alpha_i^{(k)}$, $\beta_i^{(k)}$ – диагональные матрицы коэффициентов жесткости и диссипации соединения k -го схвата, $\Delta \mathbf{x}_r^{(k)}$, $\Delta \mathbf{x}_c^{(k)}$ – смещения этой же точки, измеренные в последних системах координат k -й руки позиционирующего робота и крана со-

ответственно. Полученные силы $F_s^{(k)}$ преобразуем к обобщенным силам, в результате чего уравнения динамики элементов комплекса принимают вид

$$M_r^{(k)} \ddot{q}_r^{(k)} = D_r^{(k)}(q_r^{(k)}) \dot{q}_r^{(k)} + b_r^{(k)}(q_r^{(k)}, \dot{q}_r^{(k)}) - (G_r^{(k)}(\Delta x_r^{(k)}, q_r^{(k)}))^T F_s^{(k)}, \quad (7)$$

$$M_c = D_c(q_c) \dot{q}_c + b_c(q_c, \dot{q}_c) + M_{wc} + \sum_{k=1}^3 G_c^T(\Delta x_c^{(k)}, q_c) F_s^{(k)}. \quad (8)$$

На основании уравнений (6)-(8) получим структурную схему модели РМК (рис. 2.), которая может быть использована для моделирования монтажных операций и построения управляющих алгоритмов.

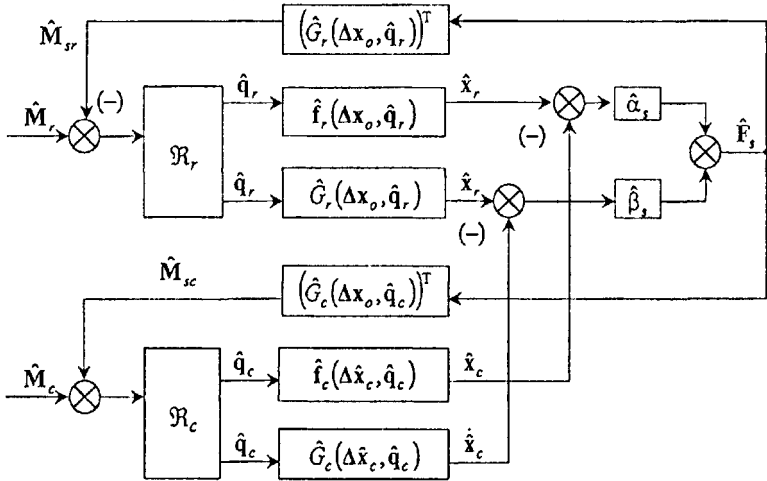


Рис. 2. Структурная схема модели РМК

В третьей главе рассмотрены особенности и методы управления РМК. Задача управления РМК решается на основе трехуровневой организации алгоритмов управления: первый (верхний) уровень - нахождения закона движения панели $x_p^*(t)$ и $\varphi_p^*(t)$, обеспечивающего оптимизацию скорости с учетом ограничения усилий в вакуумных захватах $F_s^*(t)$; второй (средний) уровень - определение управления панелью посредством усилий $F_s^*(t)$ в соответствии принципом разделения функций между краном и роботом; третий (нижний) уровень - формирование законов управления приводами робота $u^*(t)$, обеспечивающих реализацию траекторий $q_r^*(t)$ и сил взаимодействия с панелью $F_r^*(t)$, а также закон управления обобщенными силами крана $M_c^*(t)$, на основе задания желаемой траектории $x_p^*(t)$.

Синтез локальных алгоритмов управления позиционирующего робота выполнен без учета деформаций манипулятора, так как их значения невелики и за счет большой инерционности панели мало влияют на ее динамику. Особен-

ностью построения управляющих алгоритмов нижнего уровня является обеспечение манипуляторами требуемых усилий $\mathbf{F}_i^{(k)}$. В соответствии с уравнением динамики робота (7), требуемые обобщенные силы равны

$$\mathbf{M}_r^* = D_r(\mathbf{q}_r^*) \cdot \ddot{\mathbf{q}}_r^* + \mathbf{b}(\mathbf{q}_r^*, \dot{\mathbf{q}}_r^*) - G_r^T(\Delta \mathbf{x}_o, \mathbf{q}_r^*) \cdot \mathbf{F}_i^*. \quad (9)$$

В соответствии с синергетической теорией для обеспечения асимптотически устойчивого управления задаем желаемым многообразием Ψ , и переходным процессом, по которому оно стремится к нулю:

$$\dot{\Psi}_r = I - I^*; \quad \Psi_r + \lambda_r \Psi_r = 0, \quad (10)$$

где I, I^* – действительный и требуемый ток привода робота λ_r – постоянная времени управления. Ее значение выбирается из условий физической осуществимости и плавности управления: $10/\Delta t_{r,2} \leq \lambda_r \leq 0,4/\Delta t_{r,3}$. В результате решения системы уравнений (9), (10) с учетом уравнений двигателя постоянного тока получен закон управления приводами манипулятора, изменяющий обобщенные силы по аperiodическому закону:

$$\mathbf{u}^* = R\mathbf{I} + k_\omega e\dot{\mathbf{q}} + L\mathbf{I}^* + L\lambda_r(\mathbf{I}^* - \mathbf{I}); \quad \mathbf{I}^* = \mathbf{M}_r^*/(k_m e) \quad (11)$$

где R, L – сопротивление и индуктивность якорной цепи; k_ω, k_m – коэффициенты самоиндукции и передачи по току; e – передаточное число редуктора.

При построении управления приводами крана в качестве выходных параметров рассматривается вектор обобщенных сил управляемых координат \mathbf{M}_c^* . При этом функцией крана является сопровождение панели вдоль траектории $\mathbf{x}_p^*(t)$ и удержание ее веса без коррекции ориентации. Целевое инвариантное многообразие в данном случае задавалось в соответствии с требованием совпадения координат точки подвеса панели, с требуемой траекторией $\mathbf{x}_p^*(t)$:

$$\Psi_c = \mathbf{q}_c' - \mathbf{f}_c^{-1}(\Delta \mathbf{x}_o, \mathbf{x}_p^*, \mathbf{q}_c^*), \quad (12)$$

где $\mathbf{f}_c^{-1}(\Delta \mathbf{x}_o, \mathbf{x}_p^*, \mathbf{q}_c^*)$ – векторная функция решения обратной задачи кинематики о положении относительно управляемых координат \mathbf{q}_c' , определяемая уравнениями (1, 2), относительно точки с нулевым смещением $\Delta \mathbf{x}_o$. Для удобства дальнейших преобразований переходной процесс задаем в форме аperiodического звена второго порядка:

$$\ddot{\Psi}_c + \lambda_{c1}\dot{\Psi}_c + \lambda_{c2}\Psi_c = 0, \quad (13)$$

где $\lambda_{c1}, \lambda_{c2}$ – постоянные управления, определяющие время и форму переходного процесса. На основании (8, 12, 13) синтезирован закон изменения обобщенных ускорений и закон изменения управляющих моментов крана:

$$\mathbf{M}_c^* = D_c'(\mathbf{q}_c) \ddot{\mathbf{q}}_c^* + \ddot{D}_c(\mathbf{q}_c) \dot{\mathbf{q}}_c^* + \mathbf{b}'_c(\mathbf{q}_c, \dot{\mathbf{q}}_c) - \sum_{k=1}^3 G_c^T(\Delta \mathbf{x}_c^{(k)}, \mathbf{q}_c) \mathbf{F}_i^{(k)*} + \mathbf{M}'_{wc}, \quad (14)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_c^* = \lambda_{c1} \left[\left(\frac{d\mathbf{f}_c}{d\mathbf{q}_c'} \right)^{-1} \left(\mathbf{x}_p^* - \frac{d\mathbf{f}_c}{d\mathbf{q}_c'} \dot{\mathbf{q}}_c^* \right) - \dot{\mathbf{q}}_c' \right] + \lambda_{c2} \left(\mathbf{f}_c^{-1}(\Delta \mathbf{x}_o, \mathbf{x}_p^*, \mathbf{q}_c^*) - \mathbf{q}_c' \right).$$

В соответствии с принципом разделения функций по установке панели из уравнения (14) исключаются составляющие, учитывающие влияние динамики панели на координаты $q_c^{(1)}$, $q_c^{(2)}$, которые потенциально могут совершать горизонтальное перемещение панели. Принимая во внимание, что установка панели осуществляется на малых скоростях, пренебрегаем действием центробежных и кориолисовых сил. В результате, уравнение (14) преобразовано к виду

$$\mathbf{F}_c^{(k)*} = D'_{cm}(\mathbf{q}_c)\mathbf{q}_c^{(k)*} + \mathbf{c}'_c(\mathbf{q}_c) + \mathbf{M}'_{ncm}, \quad (15)$$

где D'_{cm} , \mathbf{M}'_{ncm} – параметры уравнения (14) с учетом указанных упрощений.

Как показали результаты моделирования, предложенная схема управления краном позволяет компенсировать влияние возникающих колебаний башни и предотвратить срыв вакуумных захватов при их большой амплитуде.

На втором уровне с учетом введенных локальных управлений описание объекта можно упростить и представить в виде панели на шарнирном подвесе с декартовыми координатами \mathbf{x}_p и ориентацией, задаваемой вектором Φ_p . В соответствии с принципом разделения функций установки кран удерживает вес панели, т.е. управляет координатой $x_p^{(3)}$. Остальные координаты панели $\mathbf{q}_p = (x_p^{(1)}, x_p^{(2)}, \varphi_p^{(1)}, \varphi_p^{(2)}, \varphi_p^{(3)})$ необходимо контролировать посредством сил $\mathbf{F}_s^{(k)*}$, $k = \overline{1,3}$. Особенностью управления является то, что при помощи шестимерного управляющего вектора $\mathbf{F}_s^{(k)*}$ необходимо контролировать 5 координат панели $x_p^{(1)}, x_p^{(2)}, \varphi_p$. Считая координату $x_p^{(3)}$ обработанной без ошибки $x_p^{(3)} = x_p^{(3)*}$, уравнение динамики панели принимает вид

$$D_p(\mathbf{q}_p)\mathbf{q}_p + \mathbf{d}_p(\mathbf{q}_p)x_p^{(3)*} + \mathbf{b}_p(\mathbf{q}_p, \mathbf{q}_p, x_p^{(3)*}) + \sum_{k=1}^3 G_p^T(\Delta \mathbf{x}_c^{(k)}, \mathbf{q}_p, x_p^{(3)*})\mathbf{F}_s^{(k)*} + \mathbf{M}_{wp} = 0. \quad (16)$$

Производя процедуру синергетического синтеза, вводим многообразия

$$\Psi_p^{(k)} = \bar{\Gamma}_p(\Delta \mathbf{x}_c^{(k)}, \mathbf{q}_p) - \bar{\Gamma}_p(\Delta \mathbf{x}_c^{(k)}, \mathbf{q}_p), \Psi_p^{(k)} + \lambda_{p1}^{(k)}\Psi_p^{(k)} + \lambda_{p2}^{(k)}\Psi_p^{(k)} = 0, \quad k = \overline{1,3}, \quad (17)$$

где $\lambda_{p1}^{(k)}$, $\lambda_{p2}^{(k)}$ – параметры управления. Решая (17) с учетом (16), получаем закон управления панелью

$$\hat{\mathbf{F}}_s^{(k)*} = \Gamma^{-1}(\mathbf{q}_p)\delta(\mathbf{q}_p, \mathbf{x}_p^*), \quad (18)$$

где Γ – блочная матрица, размерностью 3×3 , состоящая из девяти матриц размерности 2×2 ; $\delta(\mathbf{q}_p, \mathbf{x}_p^*)$ – вектор, размерности 3. С учетом упрощений, обусловленных незначительным изменением некоторых параметров в процессе установки, уравнение (18) принимает вид

$$\mathbf{F}_s^{(k)*} = \sum_{i=1}^3 (\alpha_p^{(k,i)}\Psi_p^{(i)} + \beta_p^{(k,i)}\Psi_p^{(j)}), \\ \alpha_p^{(k,i)} = (\Gamma^{-1}(\mathbf{q}_p^0))^{(k,i)}\lambda_{p1}^{(i)}, \beta_p^{(k,i)} = (\Gamma^{-1}(\mathbf{q}_p^0))^{(k,i)}\lambda_{p2}^{(i)}, \quad (19)$$

где $(\Gamma^{-1}(\mathbf{q}_p^0))^{(k,i)}$ – элемент блочной матрицы Π^{-1} , \mathbf{q}_p^0 – значения обобщенных координат панели в наиболее характерной точке траектории

Для предотвращения перегрузок вакуумных захватов позиционирующего робота, вызванных неучтенными ветровыми нагрузками, в управление вводится эллипсовидная функция насыщения. Тогда, при выходе управления $F_s^{(k)}$ за установленные пределы $F_{s,lim}^{(i)}$, его значение будет определяться выражением

$$\bar{F}_s^{(2,k)} = \bar{F}_s^{(1,k)} F_s^{(2,k)} / F_s^{(1,k)},$$

$$\bar{F}_s^{(1,k)} = \frac{\text{sign}(F_s^{(1,k)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^3 (F_{s,lim}^{(i)} + F_{s,lim}^{(i)} F_s^{(2,k)} / F_s^{(1,k)})^2} / |F_{s,lim}^{(i)}|^2} \quad (20)$$

Удобство измерения параметров обратной связи обеспечивается введением модели панели, коррекция координат которой осуществляется слагаемыми

$$\Delta \mathbf{q}_p = (\mathbf{q}_{pc} - \mathbf{q}_p) \kappa_q, \quad \Delta \dot{\mathbf{q}}_p = (\dot{\mathbf{q}}_{pc} - \dot{\mathbf{q}}_p) \kappa_q, \quad (21)$$

где \mathbf{q}_{pc} – обобщенные координаты панели, вычисленные на основании координат крана, κ_q , κ_q – коэффициенты наблюдателя

Структурная схема контура управления панелью, объединяющая уравне-

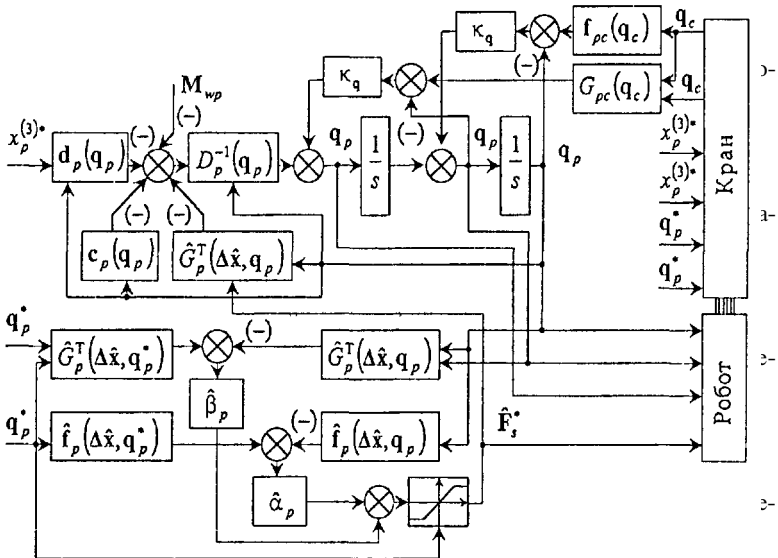


Рис. 3. Структурная схема контура управления панелью

зультаты моделирования (рис 4) показали, что в целом предложенный алгоритм распределения работы между манипуляторами обеспечивает равномерную нагрузку вакуумных захватов

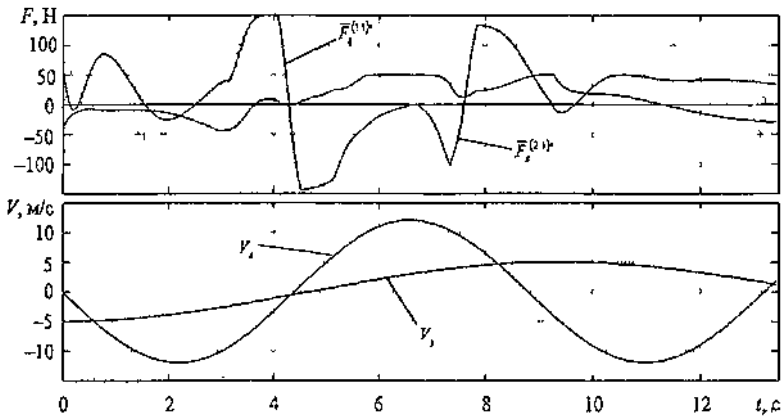


Рис. 4 Моделирование движения панели с учетом ограничения

В основу первого уровня управления положен метод двухуровневой интерполяции траектории движения манипулятора с оптимизацией скорости. Суть метода заключается в том, что на первом уровне интерполяции определяется временной закон изменения пути $S_j(t)$, а на втором уровне производится аппроксимация обобщенных координат сплайнами третьего порядка в функции перемещения. С учетом полученного на втором уровне закона движения выполняется оптимизация параметров первого уровня построения сплайнов. С целью облегчения этого этапа от аппроксимирующих функций потребуем отсутствия значительных биений. Тогда, учитывая, что усилия по установке панели вызваны в основном ее инерционными свойствами, ограничения управляющих усилий можно свести к ограничению ускорений в опорных точках.

Закон изменения пути во времени $S_j(t)$ равен

$$S_j(t) = \frac{(p_j^2 - p_{j-1}^2) V_{\max}^2 t^2}{4\bar{S}_j} + p_{j-1} V_{\max} t, \quad t \in [0, T_j], \quad j = \overline{1, m}, \quad (22)$$

где $p_j = V_j / V_{\max}$ – относительная скорость в j -й опорной точке, \bar{S}_j – величина пути между опорными точками на j -м интервале, V_{\max} – максимальная скорость, T_j – время реализации j го сплайна, m – количество интервалов аппроксимации. Полученный закон изменения пути удовлетворяет требованию отсутствия биений, так как ускорение между опорными точками постоянно. Для обеспечения непрерывности положения и скорости панели в опорных точках в качестве аппроксимирующей функции обобщенных координат выберем полином вида

$$q_{ir}^{(j)}(s) = a_3^{(j)} s^3 + a_2^{(j)} s^2 + a_1^{(j)} s + a_0^{(j)}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (23)$$

коэффициенты интерполяции которого определены из граничных условий

$$a_0^{(j)} = Q_{j-1}, \quad a_1^{(j)} = \frac{1}{2} \left(\frac{Q_j - Q_{j-1}}{\bar{S}_j} + \frac{Q_{j-1} - Q_{j-2}}{\bar{S}_{j-1}} \right),$$

$$a_3^{(j)} = \left(y \bar{S}_j - 2(Q_j - Q_{j-1} - a_1^{(j)} \bar{S}_j) \right) / \bar{S}_j^2, \quad a_2^{(j)} = \left(y - 3a_3^{(j)} \bar{S}_j^2 \right) / \bar{S}_j,$$

где $y = (Q_{j+1} - Q_j) / \bar{S}_{j+1} - a_1^{(j)}$, Q_j - векторы обобщенных координат в опорных точках.

Полученный закон интерполяции (22), (23) позволяет свести задачу оптимизации к расчету относительных скоростей p_j в промежуточных опорных точках при ограничениях на обобщенные силы

$$M_{r\text{lim}}^{(1)} \leq M_r^{(j)}(t) \leq M_{r\text{lim}}^{(2)}, \quad j = \overline{1, m}, \quad t \in [0, T_j] \quad (24)$$

В качестве функционала при оптимизации траектории использовано общее время прохождения траектории

$$\sum_{j=1}^m \frac{\bar{S}_j}{V_{\max}(p_j + p_{j-1})} \rightarrow \min. \quad (25)$$

Так как предложенный функционал не содержит экстремумов, то поиск скоростей p_j сводится к решению систем линейных уравнений, описывающих выход обобщенных сил в опорных точках на предельные значения. Уравнения системы получаются из неравенства (24) с учетом (22), (23) и уравнения динамики манипулятора в результате перебора всех вариантов выхода на ограничения путем вариации индексов обобщенной координаты $i = \overline{1, n}$ и сплайна $j = \overline{1, m}$, края сплайна $t = \{0, T_j\}$ и верхнего $M_{r\text{lim}}^{(2)}$ и нижнего $M_{r\text{lim}}^{(1)}$ пределов. Из всех допустимых решений выбирается то, которое доставляет минимум функционалу (25)

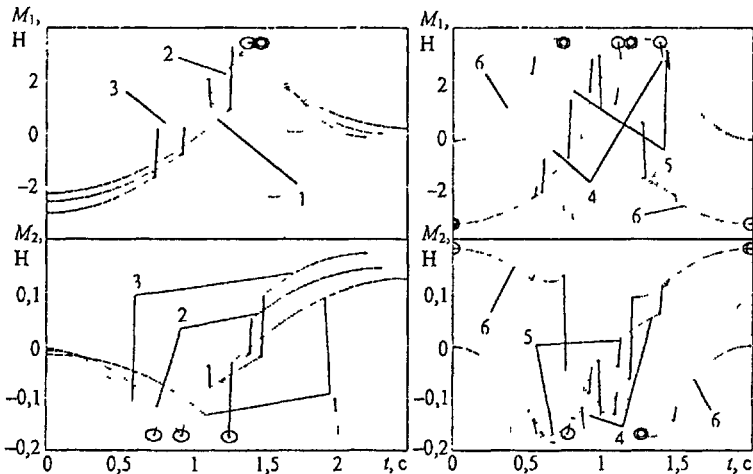


Рис. 5. Зависимости обобщенных моментов от количества промежуточных опорных точек.

○ - выход сплайна на предел, ◻ - выход двух сплайнов на предел в одной точке

Зависимость управляющих моментов от количества промежуточных опорных точек показана на рис. 5. Исследования показали, что выдвинутое предположение об отсутствии больших биений усилий оправданы в случае, когда траектория движения не имеет резких изломов, а увеличение количества опорных точек уменьшает гладкость функции обобщенных сил. При выборе этого количества необходимо учитывать, что в зависимости от длины и формы траектории, увеличение количества опорных точек на определенном этапе существенно повышает требования к вычислительным ресурсам, при этом время реализации траектории или уменьшается незначительно или даже возрастает, что требует выработки индивидуальной стратегии управления для разных технологических операций.

С целью получения замкнутого цикла пересчета опорных точек для построения и оптимизации траектории, воспользуемся степенным полиномом, учитывающим технологические требования к монтажу панелей. Требования обусловили разбиение траектории на фазы' позиционирования и посадки. Последняя фаза выполняется по линейной траектории. Граничные условия первой фазы определяются непрерывностью положения и скорости в начальной точке и равенством нулю скоростей и ускорений горизонтального перемещения панели в точке перехода между технологическими фазами для обеспечения дополнительной устойчивости монтажа.

Особенностью применения метода планирования для робототехнических комплексов с замкнутыми кинематическими структурами является избыточность вектора ограничений управления $\mathbf{F}_s^{(k)}$, так как управление приложено не к обобщенным координатам манипуляционной структуры, а в трех точках, связанных с ее последним звеном. Пересчет ограничений к базису обобщенных сил модели панели, используемой для планирования траектории, осуществляется по формуле

$$\mathbf{M}'_{ir} = \begin{pmatrix} M'_{ir}{}^{(4)} \\ M'_{ir}{}^{(5)} \\ M'_{ir}{}^{(6)} \end{pmatrix} = \mathcal{S}(\mathbf{N}_s^{(1)}, \mathbf{N}_s^{(2)}, \mathbf{N}_s^{(3)}) = \begin{pmatrix} -\sum_{k=1}^3 N_s^{(1,k)} \Delta x_c^{(2,k)} \\ \sum_{k=1}^3 N_s^{(1,k)} \\ \sum_{k=1}^3 N_s^{(2,k)} \end{pmatrix},$$

где $\mathbf{N}_s^{(k)}$ – вектора усилий в вакуумных захватах, измеренные в системе координат панели.

Пересчет эллипсовидных ограничений к базису обобщенных сил сводится к выделению прямоугольной части выпуклой нелинейной области ограничений управления панелью: Направление диагонали искомой области предлагается определять вдоль вектора удельной работы

$$\lambda_{sq} = \frac{q_{ps}^{(5)} - q_{ps}^{(6)} \quad q_{pe}^{(6)} - q_{pe}^{(5)}}{(q_{pe}^{(4)} - q_{ps}^{(4)}) J_{zz}}, \quad \frac{m_p}{J_{zz}}$$

где q_{ps}, q_{pe} – координаты панели в начальной и конечной точках траектории, m_p, J_{zz} – масса панели и момент инерции относительно вертикальной оси. Полученная методика позволяет эффективно использовать область допустимых управлений

В четвертой главе разработаны рекомендации, методики и предложения по практической реализации РМК, а так же изложены результаты математического и физического моделирования

С целью автоматизации процесса проектирования строительных роботов и роботизированных комплексов разработан интегрированный программный комплекс Robot Maker. Основными функциями программного комплекса Robot Maker являются задание параметров кинематических структур, выбор редукторов и двигателей, решение задачи кинематики, задание траекторий на основе двухуровневой интерполяции, оптимизация скорости прохождения траектории, динамический расчет манипулятора, просмотр графиков обобщенных координат, скоростей, ускорений, сил и мощностей, задание компоновок роботизированных комплексов, трехмерное отображение манипуляторов, траекторий и моделирование движения по ним. Приложение имеет многооконный интерфейс. Основу программной реализации комплекса Robot Maker составляют объектные классы Библиотеки классов, предоставляющие возможность для удобного написания и отладки программ управления позиционирующим роботом, а открытая архитектура системы, реализованная на языке C++, позволяет добавлять новые интерфейсные модули для связи с внешними устройствами

Наиболее сложным элементом монтажного комплекса для проектирования является позиционирующий робот. В диссертации разработаны рекомендации по выбору кинематических и геометрических параметров позиционирующего робота, сформулированы основные требования к роботу, которые необходимо учитывать при расчете этих параметров

Экспериментальное исследование роботизированного монтажного комплекса на основе программных комплексов Robot Maker, MatLab, MathCAD позволили установить, что установка панелей выполняется в соответствии желаемой траекторией, при этом максимальные значения усилий в захватных устройствах не превышают предельных значений, а скорости и ускорения находятся в пределах допустимых значений. Синтезированные алгоритмы управления РМК обеспечивают отсутствие резких изломов траектории установки панели в проектное положение. При действии ветровой нагрузки система обнаруживает адаптивные свойства, заключающиеся в увеличении времени позиционирования с сохранением показателей надежности. На основе математических моделей проведено всестороннее исследование характера влияния упругих свойств крана и позиционирующего робота на изменение координат панели

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научно-техническая задача повышения эффективности и безопасности выполнения монтажных операций в кранопро-

тельном домостроении путем совершенствования технологии на основе использования роботов и автоматизации производства монтажных работ.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие основные научные выводы и практические результаты:

1. Научно обоснована целесообразность автоматизации монтажных работ в крупнопанельном домостроении на основе создания роботизированных монтажных комплексов, позволяющих повысить безопасность выполнения монтажных работ, снизить трудоемкость, повысить качество работ.

2. Предложена структурная организация РМК для крупнопанельного строительства, основу которой составляет принцип раздельно-синхронного выполнения операций, определяющий характер взаимодействия оборудования и иерархические уровни управления комплексом.

3. Разработан метод построения математических моделей манипуляторов с упругими связями, основанный на принципе конечных разбиений, отличающийся введением фиктивных степеней подвижности в точках критичных к деформации, на основе которого получены математические модели крана и позиционирующего робота

4. На основе совместного применения методов декомпозиции и малого перемещения получена математическая модель РМК, позволяющая проводить анализ его динамических характеристик, прогнозировать отклонения панели, оценивать влияние внутренних и внешних возмущений.

5. Разработан алгоритм управления РМК с замкнутыми кинематическими структурами на основе синергетического подхода, заключающийся в построении трехуровневого управления, из которых нижний уровень сокращает размерность объекта, средний - решает задачу избыточности управления, а верхний - формирует траекторию движения панели с учетом ограничений.

6. На основе двухуровневой интерполяции разработан метод планирования сплайнов, сочетающий применение поисковых и аналитических алгоритмов, который оптимизирует скорости движения манипулятора в реальном времени. На его основе разработан алгоритм управления движением РМК, обеспечивающий коррекцию траектории движения с учетом ограничений в направлении максимума удельной работы.

7. Разработаны алгоритмы определения положения и ориентации панели и манипуляторов комплекса, алгоритмы оптимизации, места установки позиционирующего робота и его геометрических параметров.

8. Разработан интегрированный программный пакет для проектирования и моделирования роботов и РМК, включающий функции кинематического и динамического моделирования, планирование траекторий, визуализации движения комплекса, подготовки программ управления движением робота.

9. Выполненный комплекс исследований качества управления РМК показал эффективность разработанных методов и алгоритмов управления. В результате исследований выявлены адаптивные свойства РМК, обеспечивающие сохранение точности позиционирования при действии ветровой нагрузки в пределах допустимых значений.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Паршин Д.Я., Ткачев С.М. Планирование движения многомерного объекта // Электрооборудование в строительстве и на транспорте: Межвузов, сб. / Под ред. В.В. Кононенко. - Ростов-н/Д: Изд-во Рост. гос. строит, ун-та, 2002. - С. 28-30.
2. Ткачев С.М. Применение гибридных фазы-нейронных систем для управления адаптивным роботом // Математические методы в интеллектуальных информационных системах: Сб. тр. Международ, науч. конф. - Смоленск, 2002. - С. 87.
3. Паршин /1-Я., Ткачев С.М. Планирование движений монтажных роботов с интеллектуальным управлением // Математические методы в интеллектуальных информационных системах: Сб. тр. Международ, науч. конф. - Смоленск, 2002. - С. 108.
4. Ткачев С.М. Моделирование рабочих пространств промышленных роботов// Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XV Международ, науч. конф.: В 10 т. Т.8. Секция 8 / Под общ. ред. В.С. Балакирева. - Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. - С. 92-94.
5. Паршин Д.Я., Ткачев С.М. Математические модели многомерных мехатронных комплексов. // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XV Международ, науч. конф.: В 10 т. Т.8. Секция 8 / Под общ. ред. В.С. Балакирева. - Тамбов: Изд-во Тамб. ме. техн. ун-та, 2002. - С. 55-59.
6. Паршин Д. Я., Ткачев С. М. Моделирование ишамики манипулятора с >pr>-ими связями // Новые **ИСХОЛЮНИИ** управления движением технических обг.ек-10»: Сб. сiаТеii но маг. 5-й Международ, науч.-технической конф., 18-20 декабря 2002 г. - Новочеркасск - Росгов-н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2002. - Вып. 3, Ч. 1. - С 26-29.
7. Ткачев С.М. Моделирование динамики робоюв па основе объектно-ориеншрoаанпою проекширивания // Математические методы в ючнике и iех-нолошях.: Сб. ip. XVI Междунар. науч. конф.: В 10 т. Т. 5. Секция. 5 / Июд общ. ред. В.С. Балакирева. - Ростов-н/Д, 2003. - С. 200-202.
8. Ткачев С. М. Построение моделей и исследование динамики башенных кранов // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XVII Международ, науч. конф.: В 10 т. Т. 5. Секция 5 / Под общ. ред. В. С. Балакирева. - Кострома: Изд-во Костромского гос. технолог, ун-та, 2004. - С. 61-63.
9. Ткачев С. М. Вычисление управляющих моментов робототехнического комплекса с избы ючными связями // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XVII Международная науч. конф.: В 10 т. Т. 5. Секция 5 / Под общ. ред. В. С. Балакирева. - Кострома: Изд-во Костромского гос. технолог, ун-ia, 2004. -С 55-56.
10. Parshin D. J., Tkachev S. M. Robotic Mounting System for Large-Panel Building // Proceedings of the 21th International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC-2004 (16-18 Sept., 2004, Seoul, South Korea). - Seoul, 2004. - P. 350-353. (Паршин Д.Я., Ткачев С.М. Роботизированный монтажный комплекс для возведения крупнопанельных зданий // Материалы 21-ю международного симпозиума по автоматизации и роботизации строительства ISARC-2004 (16-18 септ., 2004, Сеул, Южная Корея). - Сеул, 2004. - С. 350-353.)

№ 26145

Подписано к печати 17.11.2004 г. Формат 60x84/16 Бумага офсетная.
Печать трафаретная. Объем 1,1 усл. печ. л., 1,0 уч.-изд. л.
Заказ № 13/2004. Тираж 120 экз. Цена договорная

Редакционно-издательский отдел РГАСХМ ГОУ
344023, г. Ростов-на-Дону, ул. Страны Советов, 1