



На правах рукописи

**ЕФРЕМОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УСТРОЙСТВА  
СБОРНОГО ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОРТОВОЙ  
МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами (строительство)

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2009

1 2 1112 2009

Работа выполнена в Московском автомобильно-дорожном институте  
(Государственном техническом университете)

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор  
Марсов Вадим Израилевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор  
Васьковский Анатолий Михайлович

Кандидат технических наук  
Голиков Евгений Петрович

Ведущая организация: Научно-производственный центр "Строительство" Российской  
инженерной академии г. Самара.

Защита состоится «27» марта 2009г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного  
совета Д 212.126.05 в Московском автомобильно-дорожном институте (Государственном  
техническом университете), по адресу: г. Москва, Ленинградский просп., д.64, ауд.42.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

Автореферат разослан «26» февраля 2009г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Михайлова Н.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Устройство автомобильных дорог с использованием сборных дорожных покрытий (СДП) является перспективным направлением современного гражданского строительства, строительства на объектах агропромышленного комплекса и подъездных дорог к местам разработки полезных ископаемых.

К числу нерешенных в настоящее время задач по снижению трудозатрат при строительстве автомобильных дорог относятся задачи устройства тяжелых (массой 100 кг и выше) железобетонных СДП, которые укладываются, в основном, ручным способом или с использованием традиционных механизмов, оснащенных малоэффективными грузозахватными устройствами (ГУ). Объем ежегодно устанавливаемых и реконструируемых СДП постоянно увеличивается и в настоящее время исчисляется миллионами погонных метров, на что в общей сложности отвлекается около 30 тыс. рабочих, из которых больше трети занято непосредственно на ручной укладке СДП. Высокий уровень затрат ручного труда в условиях устройства СДП при выполнении погрузочно-разгрузочных работ и особенно при их укладке, является результатом несовершенства применяемых организационно-технологических операций и отсутствия специальных средств механизации, автоматизации и технологического оснащения трудоемких работ.

Одним из наиболее перспективных направлений решения этого вопроса является использование манипуляторов с разработкой технологии их применения при устройстве СДП.

В настоящее время как в России, так и за рубежом ведутся исследования, направленные на создание и применение манипуляторов различного функционального назначения, однако при строительстве автомобильных дорог может быть использовано не более 1-2% от всей номенклатуры производимых в настоящее время манипуляторов. Связано это с тем, что устройство СДП, характеризуется рядом особенностей (большое разнообразие технологических операций, постоянное перемещение фронта работ, необходимость перемещения крупногабаритных и тяжелых изделий, низкая повторяемость технологических операций на одном рабочем месте), усложняющих режим работы строительных механизмов и, в частности, манипуляторов. Отсутствуют методы расчета конструктивных параметров манипуляторов, которые не учитывают в полной мере технологических особенностей устройства СДП и не охватывают необходимый состав расчетных параметров крана манипулятора и особенности его рабочего органа - грузозахватного устройства, непосредственно взаимодействующего с технологической средой.

Поэтому совершенствование технологического процесса устройства СДП на основе

применения бортовых кранов-манипуляторов, оснащенных наиболее перспективными грузозахватными устройствами, разработка научно обоснованной методики определения конструктивных параметров многозвенных манипуляторов, обеспечивающих резкое повышение производительности строительных работ, сокращение затрат трудовых ресурсов и тяжелого физического труда, является актуальной задачей.

**Цель диссертационной работы.** Совершенствование технологического процесса устройства СДП автомобильных дорог путем разработки автоматизированной технологии укладки элементов СДП на основе новых методов и средств автоматизации, позволяющей существенно повысить производительность и качества работ при одновременном уменьшении их трудоемкости.

Для достижения поставленной цели:

- выполнен анализ зарубежного и отечественного опыта автоматического управления технологическими операциями устройства СДП автомобильных дорог, методов и средств автоматизации;
- установлены аналитические зависимости конструктивных параметров манипуляционных систем во взаимосвязи с обслуживаемым технологическим пространством;
- разработана концепция программного управления перемещением манипуляционной системы в процессе укладки элементов сборного дорожного покрытия и на ее основе система автоматического управления краном-манипулятором, обеспечивающего подачу элементов СДП по заданной траектории движения и обеспечение оптимального динамического режима работы манипуляционной системы;
- разработаны алгоритмы решения задач кинематики и динамики крана-манипулятора, позволяющие реализовывать оптимальные траектории его движения при выполнении различных операций, определить систему управления, функционирующую по заданной программе;
- разработано наиболее эффективное, с точки зрения подачи и ориентации элементов СДП, грузозахватное устройство крана-манипулятора вакуумного типа;
- разработана система управления вакуумным грузозахватным устройством крана-манипулятора, которое кроме обычных функций взятия и удержания в определенном положении объектов манипулирования, автоматически выполняет ориентацию объекта в одной или нескольких плоскостях;
- проведена экспериментальная проверка полученных результатов.

**Методика исследований.** В исследованиях использованы методы математического моделирования, линейного программирования, решения систем линейных уравнений в матричной форме, математической статистики. Обработка результатов экспериментов

производилась в интерактивной математической системе MATLAB.

**Научная новизна:**

1. Разработана новая технология автоматизированной укладки элементов сборного дорожного покрытия, которая базируется на методах и средствах робототехники.

2. Установлены аналитические зависимости конструктивных параметров манипуляционной системы с учетом обслуживаемого технологического пространства.

3. Разработана методика кинематического анализа, позволяющая оптимизировать траекторию перемещения манипуляционной системы и осуществлять управление ее движением.

4. Разработаны алгоритмы решения задач кинематики и динамики крана-манипулятора, позволяющие реализовывать оптимальные траектории его движения при выполнении различных операций и математическая модель управления исполнительными устройствами крана-манипулятора.

5. Разработано наиболее эффективное, с точки зрения подачи и ориентации элементов СДП, грузозахватное устройство крана-манипулятора вакуумного типа;

6. Разработана система управления вакуумным грузозахватным устройством крана-манипулятора, которое кроме обычных функций подъема и удержания в определенном положении объектов манипулирования, должны автоматически выполнять ориентацию объекта в одной или нескольких плоскостях с обеспечением оптимального динамического режима работы манипуляционной системы.

**На защиту выносятся:**

1. Методика сравнения и выбора оптимальных кинематических структур манипуляционных систем подачи, ориентации и укладки элементов СДП в зависимости от технологических параметров рабочего пространства.

2. Кинематическая модель крана-манипулятора с вращательными кинематическими парами, методика планирования траектории его перемещений в процессе подачи, ориентации и укладки элементов СДП и поддержания оптимального динамического режима работы манипуляционной системы.

3. Эффективное, с точки зрения подачи и ориентации элементов СДП, грузозахватное устройство крана-манипулятора вакуумного типа.

4. Математическая модель сервопривода сочлененных звеньев манипуляционной системы и программное управление их перемещением в процессе устройства СДП.

**Практическая ценность работы** заключается в совершенствовании процессов устройства СДП, путем создания новой технологии автоматизированной подачи, ориентации и укладки элементов СДП, которая позволяет снизить трудоемкость производства работ на

30%, повысить их качество, улучшить условия и повысить производительность труда, сократить сроки строительства и уменьшить себестоимость сооружения автомобильных дорог на 20%.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технической конференции ИНТЕРСТРОЙМЕХ – 2008 (г. Воронеж), на конференциях МАДИ (ГТУ) (г. Москва, 2006-2008 г.), кафедре автоматизации производственных процессов МАДИ (ГТУ).

**Достоверность** полученных научных результатов подтверждена применением обоснованных и адекватных методов теоретических и экспериментальных исследований; количественными и качественными данными, полученными с помощью математического моделирования; экспериментальными исследованиями, успешным внедрением результатов в практику проектирования и технологию устройства СДП автомобильных дорог.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав основного текста, общих выводов и библиографического списка литературы, насчитывающего 88 наименований. Объем работы: 167 страниц, 56 рисунков, 14 таблиц.

**Публикации.** Основные положения диссертации отражены в 8 печатных работах.

При рассмотрении вопросов разработки системы управления вакуумным грузозахватным устройством крана-манипулятора научным консультантом являлся к.т.н., профессор Тихонов А.Ф.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, поставлены цели исследования, представлены научная новизна, достоверность и практическая значимость работы.

**Первая глава** посвящена анализу существующих методов и средств для устройства сборного дорожного покрытия.

Анализ и оценка различных типов дорожного покрытия показывает, что наиболее рациональными по эксплуатационным свойствам и удельным затратам являются сборные дорожные покрытия, изготовленные из тяжелого мелкозернистого бетона плотной структуры и тяжелого бетона на крупном заполнителе.

Главная причина, сдерживающая широкое внедрение сборных дорожных покрытий, является высокая трудоемкость несовершенствованного технологического процесса выполняемых работ, обусловленного отсутствием специализированных автоматизированных технических средств для устройства сборных дорожных покрытий.

Для повышения эффективности технологии устройства сборных дорожных покрытий необходимо снизить трудоемкость поштучного подхвата бордюрных камней, из пакетов, с

перенесением и раскладкой их у линии укладки СДП, а также последующей точной укладкой СДП по заданному уровню, используя краны-манипуляторы; механизировать погрузочно-разгрузочные операции за счет внедрения прогрессивных видов ГУ.

Требования к манипуляторному оборудованию, опираясь на результаты изучения технологии устройства СДП с применением различных механизмов, сводятся к следующему:

1. Рабочее оборудование должно быть установлено наassis или платформу мобильной базовой машины, обеспечивающей достаточную транспортную скорость при перевозке элементов СДП от места складирования до объекта строительства.

2. Рабочее оборудование, в целях обеспечения эффективного контакта его с зонами размещения элементов СДП на платформе самоходного базового агрегата и возможности укладки элементов в рабочее положение с исходных позиции, должно иметь оборудование манипуляторного типа с грузозахватным устройством и системой автоматизированного управления.

3. Стреловой механизм манипулятора должен обеспечить свободный доступ ГУ ко всем позициям размещения элементов СДП на платформе и в зоне укладки элементов в рабочее положение.

4. Грузозахватное устройство должно надежно удерживать элементы СДП различных типов, и свободно ориентировать их в горизонтальной плоскости (в плане) через любую (правую или левую) сторону платформы, а также иметь устройство, обеспечивающее наклон элементов в вертикальной плоскости.

Во второй главе выполнены теоретические исследования элементов предложенной автоматизированной технологии устройства сборного дорожного покрытия. Проведен анализ технических требований к проектируемому автоматизированному крану-манипулятору.

Определяющими, при разработке конструкции крана-манипулятора, являются вопросы, связанные с выбором оптимальной кинематической структуры и рациональных геометрических параметров манипуляционной системы подачи, ориентации и укладки элементов СДП, оценки ее функциональных возможностей.

Для выбора оптимальной кинематической структуры манипуляционной системы была использована целевая функция:  $\Phi = K_n \rightarrow \max$ , где  $K_n = \frac{V}{K \times L^3}$  – нормированный кинематический показатель,  $V$  – объем рабочего пространства манипулятора;  $L$  – полная длина звеньев манипулятора;  $K$  – коэффициент совершенства, учитывающий удобство обслуживания, простоту конструкции и затраты на эксплуатацию.

Сравнение и выбор оптимальной кинематической структуры крана-манипулятора по максимальному нормированному показателю был осуществлен в соответствии с

разработанным алгоритмом. Была выбрана оптимальная кинематическая структура, с максимальным нормированным показателем, имеющая достаточную компактность и наиболее приемлемая с точки зрения требований, предъявляемых автоматизированным процессом подачи, ориентации и укладки элементов СДП. Эффективность машины укладки сборных дорожных покрытий может быть существенно повышена при условии успешного решения комплексных проблем оптимизации как самого технологического оборудования, так и способов организации технологического процесса. Необходим выбор оптимальных параметров конструкции манипулятора (размеры звеньев стрелы, допустимые углы поворота и диапазоны перемещений и т.д.); оптимального положения шасси в процессе выполнения технологических операций; закона оптимального управления движением манипулятора.

Решение перечисленных задач основывается на анализе геометрических характеристик рабочего пространства, обслуживаемого ГУ, и их согласовании с основными параметрами выполняемого технологического процесса.

Рабочее пространство манипулятора представляет собой трехмерную область сложной геометрической формы (рис. 1).

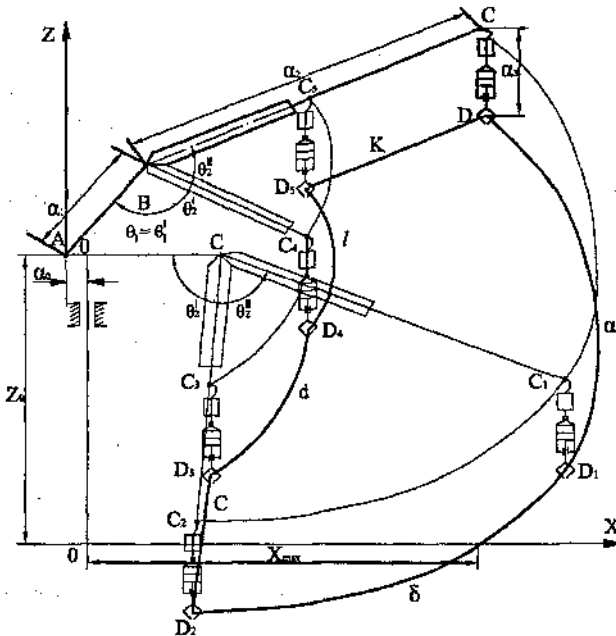


Рис.1. Рабочее пространство манипулятора



Кинематическая схема манипулятора включает четыре звена, длины которых -  $a_0, a_1, a_2, a_3$ . Параметры  $a_0$  и  $a_1$  являются постоянными, а выдвижная стрела  $a_2$  имеет переменную длину. ГУ представляет собой конструктивную часть четвертого звена, длина которого  $a_3$  также является переменной.  $\theta_0$  - угол поворота манипулятора относительно вертикальной оси  $z, z_0$  - высота точки подвеса манипулятора над горизонтальной опорной поверхностью. Рабочее пространство включает все точки  $(x, y, z)$ , получаемые при варьировании параметров  $a_2, a_3, \theta_0, \theta_1, \theta_2$  в допустимых диапазонах.

Для сечения рабочего пространства вертикальной плоскостью XOZ можно опустить из рассмотрения координату Y, зафиксировав угол поворота манипулятора относительно вертикальной оси  $\theta_0 = 0$ . В момент установки сборного дорожного покрытия ГУ должно быть ориентировано вертикально вниз. Поэтому параметр  $a_3$  не оказывает влияния на горизонтальные размеры рабочей зоны манипулятора и принимается постоянным.

Конструктивные характеристики манипулятора обуславливают возможность изменения углов между смежными звеньями в определенных диапазонах:

$$\begin{aligned} 0 &\leq \theta_1 \leq \theta_1' \\ \theta_2' &\leq \theta_2 \leq \theta_2'' + \theta_2' \end{aligned}$$

Длина выдвижной стрелы варьируется в диапазоне:  $a_2^{min} \leq a_2 \leq a_2^{max}$

Поскольку в стандартной ситуации укладка СДП осуществляется на уровне опорной поверхности, то основным интерес представляют форма и размеры сечения рабочего пространства горизонтальной плоскостью  $z=0$ .

Пересечение рассматриваемого вертикального сечения с горизонтальной плоскостью представляет собой отрезок прямой. Для рассматриваемой конструкции манипулятора этот отрезок ограничен участками границы б и с (рис. 1). Конечные точки отрезка будут:

$$\begin{aligned} x_D^{min} &= a_1 + a_2 \cos(\theta_2' - 180^\circ) - a_3 \\ z_D &= z_0 + a_2 \sin(\theta_2' - 180^\circ) - a_3 = 0 \quad (1) \\ a_2 &= \frac{a_3 - z_0}{\sin(\theta_2' - 180^\circ)} \\ x_D^{min} &= a_1 + (a_3 - z_0) \operatorname{arctg}(\theta_2' - 180^\circ) - a_0 \end{aligned}$$

Здесь  $X_D^{min}$  и  $X_D^{max}$  представляют собой минимальное и максимальное расстояния от вертикальной оси вращения  $z$  до точки захвата, измеряемые на уровне опорной поверхности. Функциональные возможности манипулятора (его область достижимости) увеличиваются с ростом  $X_D^{max}$ . Величина  $X_D^{min}$  имеет второстепенное значение, однако она должна

обеспечивать максимальное приближение ГУ к шасси.  $X_D^{\max}$  зависит от всех входящих в формулу параметров манипулятора, возрастая с увеличением  $a_1$ ,  $a_2^{\max}$  и убывая с увеличением  $a_0$  и  $z_0$ . Увеличение параметра  $a_3$  приводит к росту  $X_D^{\max}$  при  $a_3 < z_0$  и к снижению при  $a_3 > z_0$ , то есть зависимость  $X_D^{\max}(a_3)$  имеет экстремум (максимум) в точке  $a_3 = z_0$ . Выбор оптимальных значений параметров, входящих в выражение для  $X_D^{\max}$  должен основываться на анализе горизонтального сечения рабочего пространства с учетом допустимого диапазона изменения угла поворота манипулятора относительно вертикальной оси  $\theta_0$ , конкретных форм размеров шасси, а также погрешностей позиционирования шасси манипулятора при выполнении операции укладки СДП.

Горизонтальное сечение рабочего пространства представляет собой сектор кольца с радиусами  $X_D^{\min}$  и  $X_D^{\max}$ , центральный угол которого равен диапазону допустимого поворота стрелы манипулятора (рис. 2).

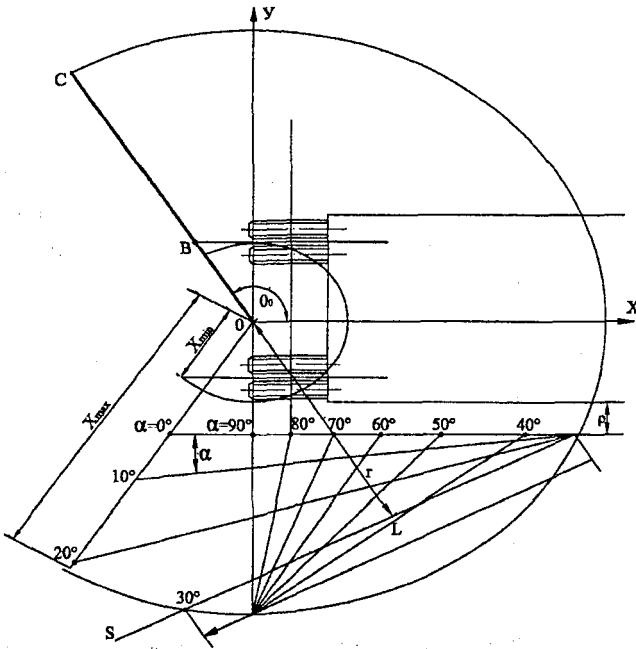


Рис.2. Горизонтальное сечение рабочего пространства

Из рассматриваемого сечения "вырезается" прямоугольная область, занятая шасси. Продольная ось шасси совпадает с осью X, от которой отсчитывается угол  $O_0$ .

Представляет интерес возможность оптимального размещения в пределах рассматриваемого сечения прямолинейного отрезка в виде, например, поперечного размера бордюрного камня, моделирующего линию укладки СДП. Число бордюрных камней, которые могут быть установлены манипулятором при фиксированном положении шасси, зависит от длины отрезка, по которому пересекаются линия S укладки бордюрных камней и горизонтальное сечение рабочего пространства (рис. 2). Если обозначить длину указанного отрезка через L, а длину бордюрного камня через l, то число n бордюрных камней определяется по формуле:

$$n = [L/l + 1] \quad (2)$$

где квадратные скобки обозначают целую часть отношения  $L/l$ .

На отрезке длины L можно разместить n точек, отвечающих геометрическим центрам бортовых камней, расстояния между которыми равны бордюрных. Значение n является важным показателем производительности крана-манипулятора, поскольку время, затрачиваемое на подготовительные операции (позиционирование шасси и его фиксации), делится на n операций укладки бордюрных камней. Величина L, входящая в формулу (2), зависит от двух параметров, определяющих положение шасси манипулятора относительно линии S укладки бордюрного камня: угла  $\alpha$  между линией укладки и продольной осью OX и длины l - перпендикуляра, опущенного из начала координат.

Оптимизация параметров конструкции манипулятора должна обеспечить максимальные значения величины n из (2), то есть требуется максимизировать значение  $X_{\max}$ , задаваемое соотношением (1). Непосредственно из (1) вытекает, что увеличение  $X_{\max}$  может быть достигнуто следующим выбором геометрических параметров манипулятора: максимальные длины подвижных звеньев  $a_1$  и  $a_2$  при минимальной длине горизонтального звена  $a_0$ .

С учетом конструктивных особенностей манипулятора высота его подвеса над уровнем опорной поверхности  $Z_0$  больше длины ГУ  $a_3$ , поэтому расширение зоны досягаемости будет иметь место при максимальной длине ГУ  $a_3$ .

Так как зависимость n от L носит дискретный характер, то увеличивать L, целесообразно только тогда, когда это приводит к скачкообразному росту n. Минимальное расстояние от вертикальной оси вращения до точки захвата  $X_D^{\min}$  имеет, с точки зрения, досягаемости, второстепенное значение и не оказывает прямого влияния на размер длины отрезка укладки L, однако, как видно из рис.2 в случае, когда  $X_D^{\min} > t$ , на отрезке укладки L будет образовываться "мертвая" зона. Чтобы избежать этого, необходимо минимизировать

$X_D^{\min}$ . На основании зависимости (2) это можно сделать, выбрав соответствующий минимальный угол  $O_2'$  между звеньями  $a_1$  и  $a_2$ .

В третьей главе проведено исследование элементов автоматизированной технологии устройства СДП.

Для описания связей между смежными звеньями комплексной системы автоматического управления краном-манипулятором с вращательными кинематическими парами был использован универсальный матричный метод Денавита и Хартенберга последовательного построения местных Декартовых систем координат, связанных с каждым звеном кинематической цепи (рис. 3).

Обычно команды управления движением краном-манипулятором формируются в пространстве углов в сочленениях, а координаты точек укладки бордюрных камней задаются в абсолютной декартовой системе координат. Для управления перемещением и ориентацией ГУ, размещенного на концевой секции крана-манипулятора, рассматриваемой кинематической конфигурации, получено решение прямой и обратной задач о положении, методом обратных преобразований в матричной форме:

$$\theta_1 = \arctg(p_y / p_x), \quad \theta_5 = \theta_1 - \arctg(o_x / n_x), \quad (3)$$

$$\theta_3 = \arccos(\frac{((d_1 - d_5 - p_z)^2 + (C_1 \cdot p_x + S_1 \cdot p_y)^2 - a_2^2 - a_3^2)}{2 \cdot a_2 \cdot a_3}),$$

$$\theta_2 = \arctg(\frac{((d_1 - d_5 - p_z) \cdot (a_3 \cdot C_3 + a_2) - (C_1 \cdot p_x + S_1 \cdot p_y) \cdot a_3 \cdot S_3)}{((C_1 \cdot p_x + S_1 \cdot p_y) \cdot (a_3 \cdot C_3 + a_2) + (d_1 - d_5 - p_z) \cdot a_3 \cdot S_3)}),$$

$$\theta_4 = 180^\circ - \theta_2 - \theta_3,$$

где  $n$  – вектор подхода;  $o$  – вектор ориентации;

$a$  – вектор нормали;  $p$  – вектор положения.

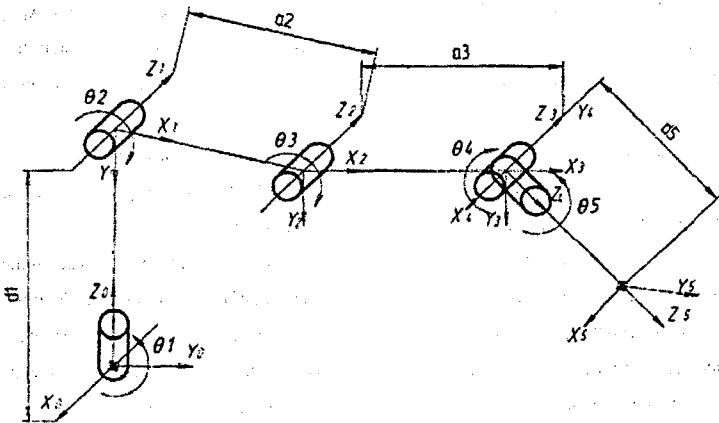


Рис.3 Расположение систем координат Денавита-Хартенберга

Поскольку оси трех смежных сочленений выбранной конфигурации распределительной стрелы параллельны между собой, решение задачи о положении получено в явном виде.

На основе полученных решений задач о положении синтезирован алгоритм вычисления обобщенных координат сочленений для реализации программированного движения крана-манипулятора.

В технологическом процессе стрела крана-манипулятора должна совершить перемещения из базового (исходного) положения и вернуться в исходное положение после окопачивания укладки бордюрного камня. Эти перемещения желательно совершать с минимальными затратами энергии и времени. Следовательно, в качестве критерия оптимизации перемещения бордюрного камня целесообразно выбрать минимум энергетических затрат  $E \rightarrow \min$ .

Условие  $E \rightarrow \min$  минимизации энергетических затрат в цикле сводится к условию:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n l_i \rightarrow \min, \text{ где } l_i \text{ — расстояние между узловыми точками укладки бордюрного}$$

камня.

Разработана методика планирования траектории перемещения стрелы крана-манипулятора. Она базируется на описании закона изменения переменных углов сочленений последовательностью полиномов. Для полного описания движения задается зависимость изменения от времени всех углов в сочленениях, а также их первых двух производных. Это позволяет получать гладкие траектории перемещения кинематической структуры.

Предложенное планирование траекторий в переменных углах сочленений предпочтительнее, поскольку задается поведение переменных, непосредственно управляемых в процессе движения сочленений стрелы крана-манипулятора.

Любая траектория перемещения сочленений должна включать в себя 4 заданных пункта: начальную и последующую точки, конечную точку подъема и начальную точку спуска.

На процесс планирования траектории перемещения крана-манипулятора накладываются технологические ограничения. Эти ограничения могут быть описаны полиномами не меньше седьмой степени. Однако использование таких полиномов нежелательно, так как они будут иметь значительное количество экстремумов, а перемещения крана-манипулятора - ненужные "блуждающие" движения.

Необходимо разбить траекторию движения между двумя точками на несколько участков, и каждый из участков интерполировать полиномом низкой степени. Данные

участки траектории перемещения крана-манипулятора должны быть непрерывны по положению, скорости и ускорению для достижения плавности хода (рис.4).

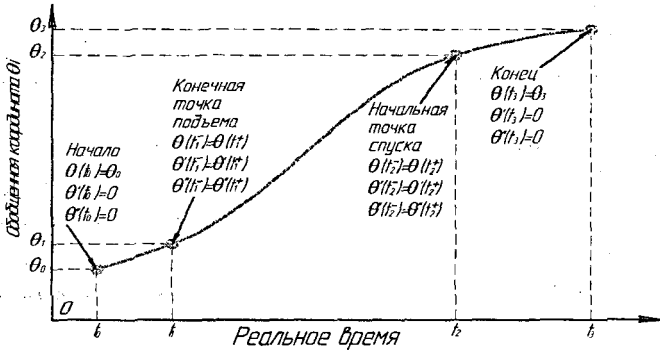


Рис. 4. Оптимальная траектория перемещения сочленения

При разбивке траектории перемещения крана-манипулятора на три характерных участка, а именно подъем, участок перемещения и спуск, существуют полиномы четвертой, третьей и четвертой степеней, хорошо аппроксимирующие их. Такая степень полиномов снижает возможность возникновения вычислительной неустойчивости.

Приведено решение линейных уравнений в матричной форме для нахождения неизвестных коэффициентов полиномов с учетом заданных ограничений. Предложена методика и разработан алгоритм вычисления траекторной функции  $\theta(t) = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5]^T$ , которая должна обновляться в каждой точке коррекции параметров движения сочленений крана-манипулятора. Для реализации алгоритма управления разработана система автоматизированного независимого управления сервоприводами в сочленениях, функциональная схема, которой приведена на рис.5.

В состав рассматриваемой системы входят блок программного управления движением, формирующий закон управления, и одноконтурная следящая система с обратной связью сервоприводов звеньев, реализующая заданный закон регулирования.

Разработана аппаратная структура микропроцессорной системы программного управления. Автоматизированное функционирование системы управления движением крана-манипулятора осуществляется с использованием программного обеспечения вычислительного устройства.

Разработанная система сервопривода звена представляет собой замкнутую одноконтурную следящую систему с обратной связью.

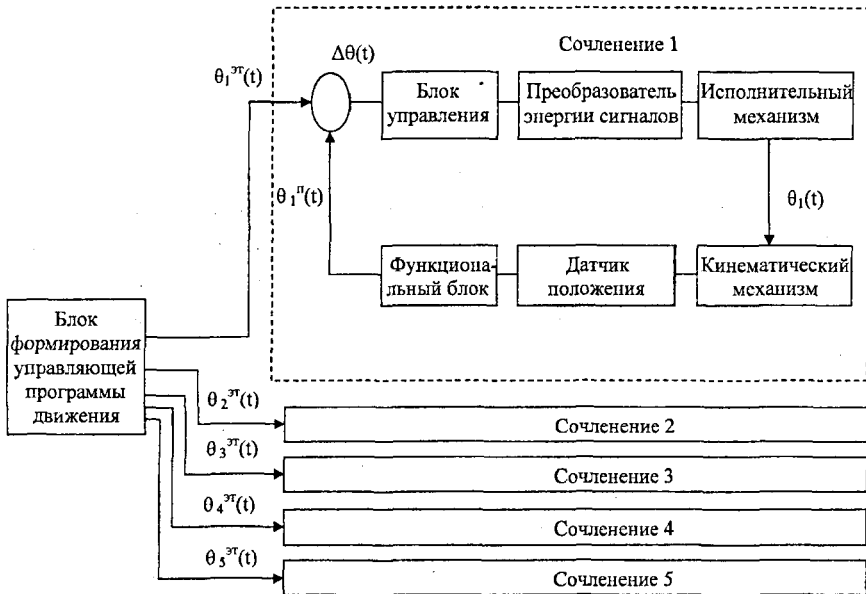


Рис.5. Функциональная схема системы управления сочленениями крана-манипулятора.

Разработан алгоритм независимого программного управления сервоприводами сочленений звеньев.

Выведены дифференциальные уравнения и синтезированы передаточные функции всех звеньев предлагаемой следящей системы. Совокупность приведенных уравнений звеньев представляет собой математическую модель независимого сервопривода звена крана-манипулятора. Используя полученные зависимости можно моделировать динамику работы автоматизированной стрелы крана-манипулятора в переходных режимах.

**Четвертая глава диссертации** посвящена разработке вакуумного ГУ для автоматизированной технологии работ по устройству СДП.

Исследования, проведенные в ЦНИИОМТП, показали, что наиболее эффективным средством для транспортирования, перегрузки и укладки СДП являются бордюрорукладочные машины с самопогрузкой и саморазгрузкой, оборудованные ГУ с гидро- или пневмоприводом, с дистанционным и автоматическим управлением. В результате этих исследований с участием автора данной работы разработано вакуумное ГУ, установленное на полуприцеп УПЛС-0906. Разработан алгоритм для новой технологии автоматизированной

подачи и фиксации бордюрного камня. Выбрана оптимальная кинематическая структура вакуумного ГУ.

В пятой главе описаны результаты экспериментальных исследований макетного образца устройства транспортирования, перегрузки и укладки СДП.

Основная цель экспериментальных исследований - оценка точности позиционирования модели манипуляционной системы для устройства СДП.

В соответствии с разработанной методикой проведения исследований, была разработана экспериментальная модель в масштабе 1:10 при длине звена 600мм, состоящая из 3-х шарнирно соединенных друг с другом звеньев. Для фиксации угловых вертикальных обобщенных координат и угловой горизонтальной обобщенной координаты использовались транспортиры с углом измерения  $360^\circ$  и координационная сетка.

В процессе эксперимента на модели манипуляционной системы были выставлены рассчитанные обобщенные координаты. После каждого позиционирования были определены декартовы координаты последней точки манипуляционной системы.

Для контроля и регистрации координат в декартовой системе, при новом положении экспериментальной манипуляционной системы, методика предусматривает применение комплекта контрольно-измерительной аппаратуры: лазерный дальномер, уровень, отвес и координационная сетка.

В результате экспериментальных исследований с помощью модели манипуляционной системы подтверждена эффективность теории позиционирования (прямой и обратной задачи кинематики). При точном позиционировании обобщенных координат манипуляционной системы погрешность её не превышает допустимых значений.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Существующие технологии по устройству сборных дорожных покрытий (СДП) отличаются наличием ряда сложных и трудоемких операций, контроль правильности исполнения которых затруднен. Кардинально решить задачу повышения их эффективности можно только путем автоматизации технологических операций устройства СДП.

2. Разработан способ автоматизации процесса устройства сборных дорожных покрытий, позволяющий принципиально изменить характер труда строительных рабочих, многократно увеличить его производительность, повысить качество и общую культуру производства.

3. Выявлены специфические особенности технологического процесса устройства сборных дорожных покрытий и определены технические требования к конструкциям



автоматизированных кранов-манипуляторов для подачи элементов СДП.

4. Предложены критерий и разработана методика выбора оптимальной кинематической структуры кранов-манипуляторов для подачи элементов СДП. Решена задача определения геометрических характеристик (длины звеньев, углов поворота сочленений звеньев) кранов-манипуляторов для заданных условий подачи и укладки элементов СДП.

5. Разработана методика кинематического анализа, позволяющая получить решение прямой и обратной задач о положении крана-манипулятора для заданных условий подачи и укладки элементов СДП, осуществлять планирование оптимальной траектории его перемещения. Экспериментальные исследования подтвердили адекватность предложенной методики реальному технологическому процессу устройства СДП.

6. Синтезированы алгоритмы программного управления перемещением звеньев крана-манипулятора для заданных условий подачи и укладки элементов СДП. Разработана математическая модель управления исполнительными устройствами, позволяющая моделировать динамику работы крана-манипулятора в переходных режимах.

7. Разработано вакуумное грузозахватное устройство, как наиболее эффективное для устройства сборных дорожных покрытий.

8. Внедрение предлагаемой технологии автоматизации процессу устройства СДП позволит повысить производительность труда на 30% и сократить себестоимость производства работ на 20%.

9. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при разработке перспективных технологических устройств и автоматизированных систем управления процессом устройства СДП, оптимальные технические характеристики и алгоритмы функционирования которых определяются по предложенным методикам.

**Основные результаты диссертации изложены в работах**

1. Ефремов Д.А. Математическая задача манипулирования и угловой ориентации строительного робота // «Подъемно-транспортные строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы». Сб. науч. тр. – М.: МГСУ, 2006, с. 86-88.
2. Ефремов Д.А., Базин С.С. Автоматизированное управление звеньями строительного манипулятора // Сб. науч. тр. «Интерстроймех - 2006». – М.: МГСУ, 2006, с. 206-210.
3. Ефремов Д.А., Базин С.С., Минцаев М.Ш. Особенности перемещения распределительной стрелы строительного робота // Вестник МАДИ (ГТУ), вып.3(10), 2007, с.56-58.
4. Ефремов Д.А., Либенко А.В., Базин С.С. Структуры и параметры манипуляционных систем в строительстве // Сб. науч. тр. «Инновационные технологии в промышленности, строительстве и образовании». – М.: МАДИ(ГТУ), 2007, с. 137-142.
5. Либенко А.В., Ефремов Д.А. Базин С.С. Оценка статистических параметров непрерывных технологических процессов // Сб. науч. тр. «Проектирование и технологии электронных средств». – Владимир, вып.3, 2007, с. 31-33.
6. Либенко А.В., Базин С.С., Ефремов Д.А. Определение передаточной функции системы при случайном входном воздействии // Сб. науч. тр. «Проектирование и технологии электронных средств». – Владимир, вып.3, 2007, с. 29-30.
7. Тихонов А.Ф., Базин С.С., Ефремов Д.А. Система автоматизированного управления электроприводом грузоподъемного крана // «Механизация строительства», М.: №2, 2009, с.40-42.
8. Ефремов Д.А., Захаров Я.В., Марсов В.И. Определение оптимальных траекторий перемещений рабочего механизма строительного манипулятора // Сб. науч. тр. «Интерстроймех - 2009». – М.: МГСУ, 2009, с. 51-53.

**КОПИ-ЦЕНТР** св. 7:07:10429 Тираж 100 экз.  
Подписано в печать 25.11.2009 г.  
г. Москва, ул. Енисейская, д.36  
тел.: 8-499-185-7954, 8-906-787-7086