

1544690

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ  
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Э. БАУМАНА

---

На правах рукописи  
УДК 621.865.8:62-52

ШВЕДОВ Вадим Валерьевич

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И ДИНАМИКА МОБИЛЬНОГО  
МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА

05.02.05 - Роботы, манипуляторы и робототехнические  
системы

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 1993

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана

Научный руководитель - доктор технических наук,  
профессор Лакота Николай Андреевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
профессор Кулешов Владимир Сергеевич  
кандидат технических наук  
Андрюнин Валерий Викторович

Ведущая организация - КБ точного машиностроения

Защита диссертации состоится "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1993 г.  
на заседании специализированного совета К053.15.06 в  
Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и орде-  
на Трудового Красного Знамени государственном техническом уни-  
верситете имени Н. Э. Баумана \_\_\_\_\_ 1993 г. Москва, 2-ая  
Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на авторе-  
печатку, просим направить

С диссертацией можн

Автореферат разосла

Ученый секретарь  
специализированного сое  
кандидат технических на

1544690

Актуальность.

В настоящее время пристальное внимание исследователей и разработчиков робототехнических систем привлекают мобильные робототехнические системы, предназначенные для использования как в производственных помещениях, так и в экстремальных средах. К их числу, в первую очередь следует отнести предприятия атомной энергетики, химической промышленности и взрывоопасные производства. Анализ видов технологических операций показывает, что мобильные роботы могут быть эффективно использованы, как на эксплуатируемых, так и на аварийных объектах для:

- текущего контроля и диагностики рабочего оборудования, коммуникационных систем (трубопроводов, электрических кабелей и т. п.);
- радиационной и химической разведки помещений;
- дезактивации и обеззараживания помещений, техники и оборудования;
- сборки/разборки конструкций;
- сварки/резки металла;
- разрушения кирпичных и бетонных конструкций;
- подъемно-транспортных операций и др.

Создание мобильных робототехнических комплексов такого назначения связана с необходимостью разработки методов дистанционного, полуавтоматического и автоматического управления. В частности, должны получить свое дальнейшее развитие методы полуавтоматического и автоматического управления движением робототехнического комплекса по заданному маршруту, а также методы управления манипуляторами, установленными на колесно-гусеничном шасси и предназначенными для перемещения и ориентации средств диагностики или рабочего инструмента при проведении инспекционных или ремонтных работ при штатных или аварийных ситуациях.

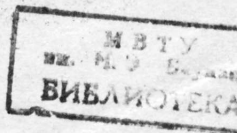
В настоящей диссертации разрабатываются методы автоматического управления транспортным средством, развивается метод

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1544690

Шведов В.В. Алгоритмы упра



управления по вектору скорости применительно к мобильному манипуляционному роботу (ММР), предлагается методика синтеза системы управления ММР, в основе которой лежит идея синтеза локальных подсистем робота.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка алгоритмического обеспечения системы управления ММР, предназначенным для выполнения различных технологических операций.

#### Задачи исследования.

В диссертации решены следующие задачи:

- обоснование кинематической схемы транспортного средства;
- синтез кинематических алгоритмов управления движением транспортного средства по программным траекториям;
- синтез алгоритмов управления движением схвата бортового манипулятора мобильного робота;
- разработка математических моделей динамики системы "транспортное средство - манипулятор";
- синтез системы управления приводами;
- разработка экспериментального образца транспортного средства и экспериментальное исследование системы управления;
- разработка пакета прикладных программ для исследования динамики системы.

#### Методы исследования.

При решении задач в работе использовались методы аналитической механики, теории обыкновенных дифференциальных уравнений, теории устойчивости, методы математического моделирования и теории оптимизации, а также экспериментальное исследование системы управления на натурном моделирующем комплексе.

#### Достоверность результатов.

Достоверность результатов базируется на строгом и обоснованном применении математического аппарата. Результаты аналитических исследований подтверждены при моделировании движения ММР на персональном компьютере типа IBM PC и при натурном моделировании движения экспериментального образца мобильного робота.

### Научная новизна.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований в работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана методика математического описания динамики механической системы "транспортное средство - манипулятор" с учетом негोलсоновых связей транспортного средства.

2. Развита математические основы синтеза алгоритмического обеспечения системы управления движением мобильного манипуляционного робота.

3. Развита методика проектирования приводной системы транспортного средства мобильного манипуляционного робота.

### Практическая ценность работы.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Синтезированы эффективные алгоритмы управления движением транспортного средства мобильного робота по заданным маршрутам.

2. Синтезированы алгоритмы управления движением схвата бортового манипулятора мобильного робота по вектору скорости.

3. Разработаны рекомендации по проектированию системы управления мобильного манипуляционного робота.

4. Разработан пакет прикладных программ, который позволяет моделировать процессы управления и исследовать динамику системы "транспортное средство - манипулятор". Применение пакета программ существенно сокращает время проектирования систем управления мобильных роботов.

5. Разработанные методики и алгоритмы могут быть использованы при проектировании систем управления мобильных роботов, предназначенных для выполнения различных технологических операций.

### Реализация результатов работы.

Основные результаты работы использовались в КБ точного машиностроения, НПО НИКИМТ, ПО "Спецатом", в Научно-исследовательском институте специального машиностроения МГТУ им. Н. Э. Баумана при проектировании мобильного манипуляционного робота "ОМАР".

### Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались: на международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы фундаментальных наук" /г. Москва, 1991 г./, Всесоюзном научном семинаре "Проблемы управления упругими мехатронными системами" /г. Иркутск, 1991 г./, а также на семинаре "Проектирование алгоритмического обеспечения систем автоматического управления" /г. Москва, 1992 г./.

### Публикации.

По теме диссертации опубликовано 4 научные работы, в том числе 3 статьи в центральных и международных научных журналах. Кроме того, результаты работы использованы в двух научно-исследовательских отчетах НИИСМ МТУ им. Н. Э. Баумана.

### Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 51 наименования и приложений.

Объем диссертационной работы составляет 181 страниц, из них 99 страниц машинописного текста. Работа содержит 28 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, дан обзор литературы отечественных и зарубежных авторов, посвященной вопросам создания систем управления мобильных роботов, а также излагается краткое содержание работы.

В первой главе синтезируются кинематические алгоритмы управления движением транспортного средства мобильного робота, обеспечивающие вычисление требуемых значений управляемых параметров из условия осуществления движения по назначенной траектории. Положение транспортного средства относительно заданной траектории определяется с помощью направляющей точки, координаты которой задаются в виде функций времени в базовой системе.

В п. 1.1 выполнен анализ различных типов схем колесных

двигателей существующих мобильных роботов и обоснована кинематическая схема транспортного средства, принятого для исследования и разработки алгоритмов управления движением. В качестве такого транспортного средства принят трехколесный аппарат (рис. 1). Переднее колесо робота имеет рулевой и тяговый приводы, которые обеспечивают реализацию традиционного рулевого управления. Бортовое управление обеспечивается, если пара задних колес имеет отдельные тяговые приводы. Для транспортного средства принятой схемы выведены кинематические уравнения относительно параметров движения аппарата. Выведенные уравнения являются универсальными в том смысле, что алгоритмы управления, разработанные для аппарата такой схемы и результаты исследования его кинематики и динамики можно распространить на аппараты других кинематических схем.

В п. 1.2 для принятой схемы транспортного средства синтезированы алгоритмы управления, обеспечивающие движение аппарата по назначенной траектории. В случае традиционного рулевого управления вычисляются требуемые значения углов поворота руле-

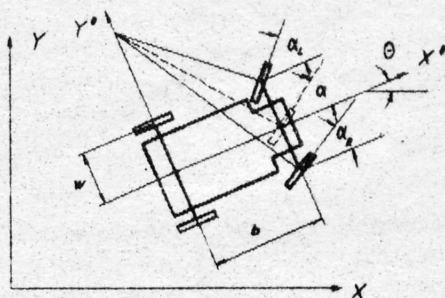


Рис. 1. Кинематическая схема исследуемого транспортного средства мобильного робота

вого колеса  $\alpha$  и угловой скорости его вращения  $\omega$  :

$$\alpha = \operatorname{sgn} \frac{\dot{S}}{\dot{\theta}} \arctg \left[ \left( \sqrt{\frac{\dot{S}^2}{\dot{\theta}^2} - x^{o^2} + y^{o^2}} \right) b^{-1} \right],$$

$$\omega = \frac{\dot{\theta} b}{R \sin \alpha},$$
(1)

где  $\dot{S}$  - путевая скорость направляющей точки;  $\dot{\theta}$  - угловая скорость вращения робота;  $x^o$  и  $y^o$  - координаты НТ в системе координат, связанной с транспортным средством;  $b$  - база аппарата;  $R$  - радиус колеса.

В случае бортового управления вычисляются требуемые значения угловых скоростей вращения правого и левого приводных колес  $\omega_K$  и  $\omega_L$  :

$$\omega_K = \left[ (W + y^o) \dot{\theta} + \sqrt{\dot{S}^2 - x^{o^2} \dot{\theta}^2} \right] / R,$$

$$\omega_L = \omega_K - 2W \dot{\theta} / R,$$
(2)

где  $W$  - половина расстояния между колесами транспортного средства.

Для определения управляемых параметров по (2) и (3) необходимо знать в каждый момент времени значение угловой скорости вращения аппарата, которое вычисляется в результате решения следующего нелинейного дифференциального уравнения:

$$\dot{\theta} = \frac{1}{x^o} (y^o \cos \theta - x^o \sin \theta),$$
(3)

где  $\theta$  - курс аппарата;  $y$  и  $x$  - координаты НТ в инерциальной системе координат.

В п. 1.3 приводятся решения уравнения (3) для типовых участков траектории: прямолинейного отрезка и дуги окружности. Для прямолинейного отрезка угловая скорость вращения аппарата находится следующим образом:

$$\dot{\theta} = - \frac{2 \dot{S} \operatorname{sgn}(\theta_0 - \varphi)}{X^0} \frac{e^{\mu(S)}}{1 + e^{2\mu(S)}}, \quad (4)$$

где:  $\theta_0$  - начальный курс аппарата;  $\varphi$  - угол наклона траектории к оси X;  $S$  - пройденный НТ путь;  $\mu(S)$  - переменная, зависящая от пройденного пути и начальных условий.

В случае движения робота по дуге окружности  $\dot{\theta}$  равна:

$$\dot{\theta} = -2 \operatorname{sgn} \varphi_s \cdot \frac{\dot{S}}{Z_s} \cdot \frac{2(\varphi)}{1 + \varphi^2(\varphi)}, \quad (5)$$

где:  $\varphi_s$ ,  $\varphi$  - заданный и текущий углы поворота;  $Z(\varphi)$  - переменная, зависящая от  $\varphi_s$  и  $\varphi$ , радиуса окружности  $Z_s$  и положения НТ системе координат X Y Z.

Произвольная траектория движения транспортного средства аппроксимируется последовательностью прямолинейных отрезков и дуг окружности. В п. 1.4 на основе анализа движения аппарата по аппроксимированной траектории показано, что синтезированные кинематические алгоритмы обеспечивают непрерывность управляемых параметров в точках сопряжения типовых отрезков траектории.

Во второй главе синтезируются алгоритмы формирования управляющих сигналов на исполнительные приводы ММР по заданному вектору скорости схвата бортового манипулятора. Целесообразность управления ММР по вектору скорости обусловлена тем, что транспортное средство робота имеет неголономные связи, что исключает возможность разработки алгоритмов управления, основанных на решении серии обратных задач о положении.

В п. 2.1 для ММР с принятой схемой движителя транспортного средства решена прямая задача кинематики относительно вектора скорости схвата бортового манипулятора, т.е. найдены выражения, позволяющие по известным обобщенным скоростям манипулятора, линейной и угловой скоростям транспортного средства определить вектор скорости схвата манипулятора в различных системах координат.

В п. 2.2 решена обратная задача кинематики ММР относительно вектора скорости схвата манипулятора. Сведение решения об-

ратной задачи к нахождению минимума квадратичной функции потерь позволило учесть избыточность степеней подвижности ММР относительно степеней свободы схвата. Квадратичная функция имеет следующий вид:

$$C = \frac{1}{2} (\dot{\bar{Q}}_c^T A \dot{\bar{Q}}_c + \dot{\bar{q}}_m^T B \dot{\bar{q}}_m), \quad (5)$$

где  $\dot{\bar{Q}}_c = (V_p \dot{\Theta})^T$  и  $\dot{\bar{q}}_m$  - векторы скоростей шасси и манипулятора соответственно;  $V_p$  - линейная скорость полюса вращения шасси;  $A$  и  $B$  - диагональные матрицы весовых коэффициентов.

Решение обратной задачи в системе координат, связанной с транспортным средством, будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{Q}}_c &= A^{-1} J_c^T (J_c A^{-1} J_c^T + J_m B^{-1} J_m^T)^{-1} \dot{S}^0, \\ \dot{\bar{q}}_m &= B^{-1} J_m^T (J_c A^{-1} J_c^T + J_m B^{-1} J_m^T)^{-1} \dot{S}^0, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\dot{S}^0$  - заданный вектор скорости схвата в связанной СК;  $J_c$  и  $J_m$  - якобианы шасси и манипулятора соответственно.

В п. 2.3.1 рассмотрены вопросы реализации управления ММР по вектору скорости для случаев, когда транспортное средство имеет бортовое (БУ) и традиционное рулевое (ТРУ) управления. При бортовом управлении вектор  $\dot{\bar{Q}}_c = (\omega_x, \omega_z)^T$ , а якобиан транспортного средства выглядит следующим образом:

$$J_c = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} (\bar{u}_x^T + \frac{1}{w} K_2 \bar{R}^0) & \frac{R}{2} (\bar{u}_x^T - \frac{1}{w} K_2 \bar{R}^0) \\ \frac{R}{2w} \bar{u}_z^T & -\frac{R}{2w} \bar{u}_z^T \end{bmatrix} \quad (7)$$

где  $R$  - радиус ведущих колес;  $\bar{R}^0$  - радиус-вектор, характеризующий положение схвата в системе координат транспортного средства;  $\bar{u}_x$  и  $K_2$  - вектор и матрица с постоянными элементами. Структурная схема системы управления по вектору скорости ММР с БУ представлена на рис. 2. Вид матрицы  $L$  зависит от вы-

бора системы координат, в которой формируется заданный вектор скорости схвата  $\dot{\bar{S}}_n$ .

Для ММР с ТРУ вектор  $\dot{\bar{Q}}_c = (\omega \dot{\alpha})^T$ , а якобиан транспортного средства имеет следующий вид:

$$J_c = \begin{bmatrix} R(\cos \alpha_0 \bar{U}_x + \frac{r}{b} \sin \alpha_0 K_2 \bar{R}^T) & R \omega_0 (-\sin \alpha_0 \bar{U}_x + \frac{r}{b} \cos \alpha_0 K_2 \bar{R}^T) \\ \frac{R \sin \alpha_0}{b} \bar{U}_2^T & \frac{R \omega_0 \cos \alpha_0}{b} \bar{U}_2^T \end{bmatrix} \quad (8)$$

где  $\alpha_0$  и  $\omega_0$  - значения угла поворота рулевого колеса и угловой скорости его вращения в некоторый момент времени. Структурная схема системы управления по вектору скорости ММР с ТРУ представлена на рис. 3.

В третьей главе выполнено математическое описание динамики системы "транспортное средство - манипулятор"; получена нелинейная математическая модель системы на основе уравнений Вронца, учитывающих нелинейные связи транспортного средства МР; проведена линеаризация уравнений, исследованы динамические характеристики объекта управления, выполнена оценка взаимовлияния каналов управления и проведен синтез локальных регуляторов. С учетом динамики приводов выполнено исследование устойчивости взаимосвязанных каналов управления.

В п. 3.1 выводятся уравнения динамики мобильного манипуляционного робота, которые в векторно-матричной форме имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} A_{cc} \ddot{\bar{q}}_c + A_{cm} \ddot{\bar{q}}_m + (B_{cc} + C_{cc}) \dot{\bar{q}}_c + B_{cm} \dot{\bar{q}}_m &= F_c \bar{m}_c, \\ A_{mc} \ddot{\bar{q}}_c + A_{mm} \ddot{\bar{q}}_m + (B_{mc} + C_{mc}) \dot{\bar{q}}_c + B_{mm} \dot{\bar{q}}_m + \bar{d}_m &= \bar{m}_m, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\bar{q}_m$  и  $\bar{q}_c$  - обобщенные координаты манипулятора и транспортного средства соответственно;  $\bar{m}_m$  и  $\bar{m}_c$  - моменты, развиваемые приводами бортового манипулятора и транспортного средства. Матрицы  $A_{cc}$ ,  $A_{cm}$ , ...,  $C_{mc}$  и вектор  $\bar{d}_m$  определяются инерционно-массовыми и габаритными характеристиками ма-

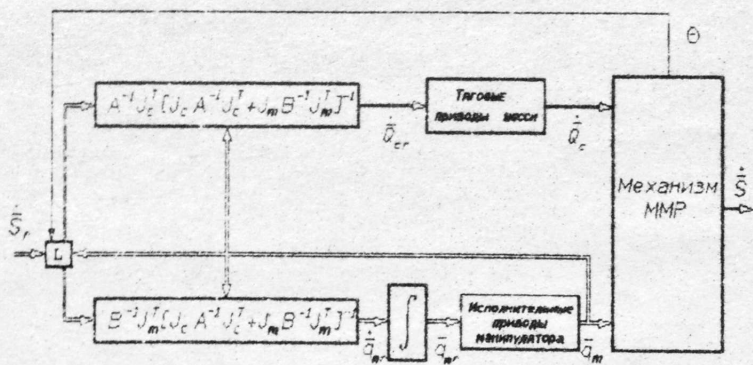


Рис. 2. Структурная схема системы управления по вектору скорости мобильного манипуляционного робота с бортовым управлением

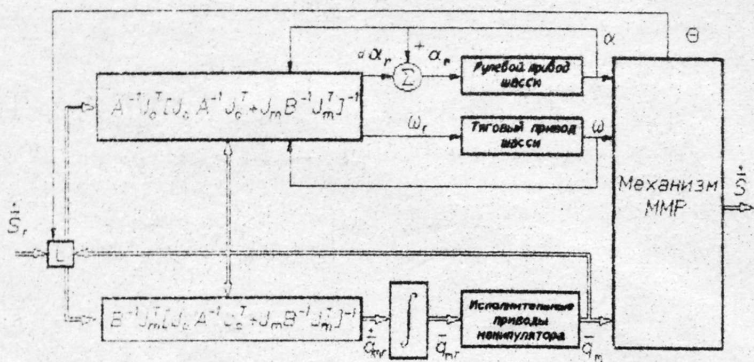


Рис. 3. Структурная схема системы управления по вектору скорости мобильного манипуляционного робота с традиционным рулевым управлением

нипулятора и транспортного средства.

В п. 3.2 проведено исследование уравнений динамики ММР. По уравнениям линейного приближения исследованы частотные свойства и динамические характеристики объекта управления, в том числе взаимовлияние каналов управления. При этом установлено, что ПИД-регулирование в контурах управления приводами шасси обеспечивает снижение наибольшего уровня взаимного влияния приводов транспортного средства на каналы управления манипулятора с -20 до -40 дБ. Исследование устойчивости системы "транспортное средство - манипулятор" выполнено с помощью частотных методов.

На основе выведенных уравнений составлена программа моделирования динамики ММР с БУ, с помощью которой проведены исследования влияния весовых коэффициентов (входящих в кинематические алгоритмы управления по вектору скорости) на точность выдерживания заданной траектории.

Анализ частотных свойств объекта управления, проведенный в работе, позволил сделать вывод о возможности применения классического, наиболее часто встречающегося на практике подхода, при котором для каждой следящей системы синтезируется независимый локальный регулятор, обеспечивающий устойчивость отдельного привода без учета других элементов робота.

Общая схема последовательности синтеза системы управления ММР приведена на рис. 4.

В четвертой главе изложены результаты экспериментальных исследований процесса управления движением транспортного средства с помощью разработанных алгоритмов. Задачами исследования являлись:

- определение диапазона скоростей и минимальных радиусов поворота транспортного средства, позволяющие исключить центробежные силы, приводящие к боковому скольжению колес;
- разработка рекомендаций по выбору направляющей точки транспортного средства;
- определение влияния сил трения между колесами и опорной поверхности на точность отработки заданной траектории;
- разработка рекомендаций по учету сил трения в алгоритме

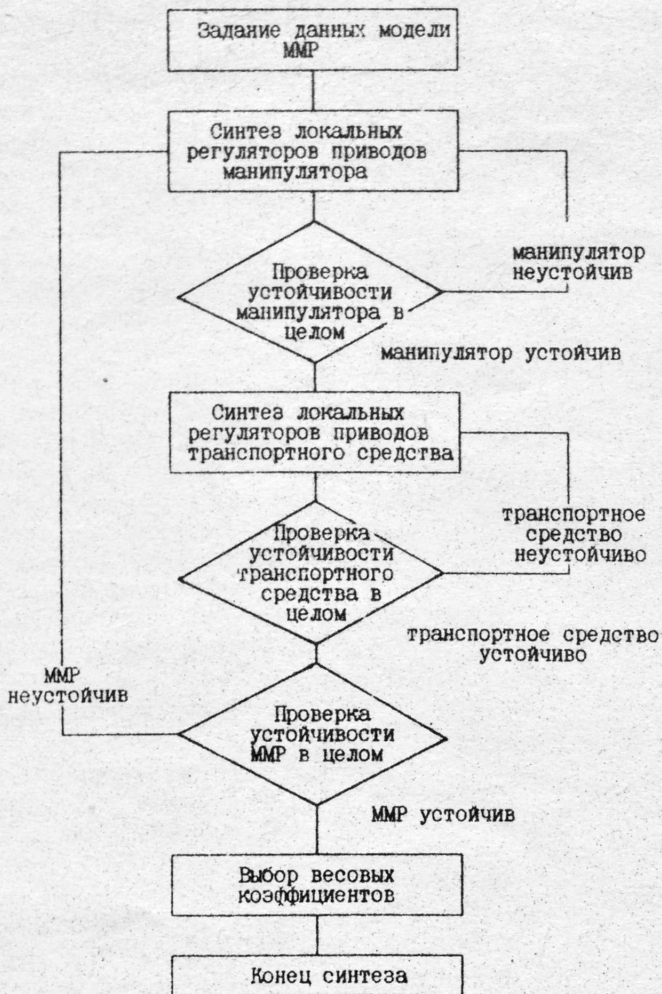


Рис. 4. Блок-схема последовательности синтеза системы управления мобильного манипуляционного робота

управления движением транспортного средства мобильного робота по программным траекториям.

Для экспериментальных исследований был разработан и создан экспериментальный образец транспортного средства мобильного робота, который состоит из двух основных подсистем: поста управления и непосредственно транспортного средства (рис. 5).

Мобильный робот представляет собой трехколесный аппарат с бортовым механизмом управления. Два колеса, имеющие отдельные приводы, расположены в задней части транспортного средства. На борту МР расположены два широтно-импульсных преобразователя, два усилителя мощности и специальное графическое устройство, позволяющее фиксировать траекторию движения робота. В качестве ДОС использовались тахогенераторы.

Пост управления включает в себя персональный компьютер, два цифро-аналоговых преобразователя, коммутируемый аналого-цифровой преобразователь и комплект прикладных программ.

В результате экспериментальных исследований установлено, что при учете в алгоритме управления ошибки поворота реальный

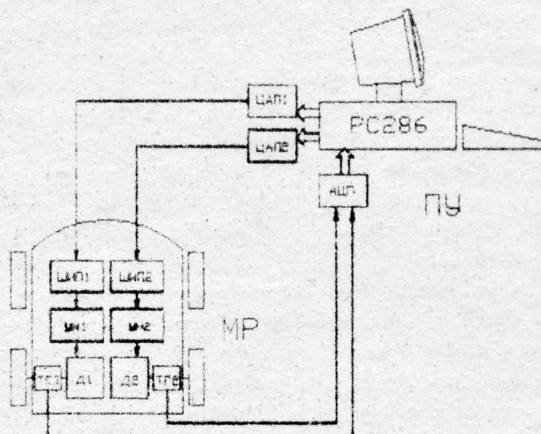


Рис. 5. Функциональная схема экспериментального мобильного робота

угол поворота отличается от заданного угла не более чем на 3%. При этом ошибка между начальным и конечным положениями направляющей точки при движении мобильного робота по замкнутому контуру составляет не более 2% от заданной длины траектории.

В заключении приведены основные выводы по диссертационной работе.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе анализа кинематики движителей существующих транспортных средств мобильных роботов обоснована кинематическая схема транспортного средства, принятого для исследования и разработки алгоритмов управления движением.

2. Выведены расчетные соотношения (кинематические алгоритмы управления), обеспечивающие движение транспортного средства мобильного робота по назначенной траектории для традиционного рулевого и бортового способов управлений. Выполнен анализ движения аппарата по аппроксимированной траектории и показано, что кинематические алгоритмы обеспечивают непрерывность управляемых параметров в точках сопряжения типовых отрезков траектории.

3. Решены прямая и обратная задачи кинематики относительно вектора скорости схвата манипулятора. По найденным выражениям выведены расчетные соотношения (кинематические алгоритмы управления) для вычисления требуемых значений управляемых параметров. Синтезированные алгоритмы реализуют управление мобильным роботом и с бортовым и с рулевым способами управления по вектору скорости схвата.

4. Разработана нелинейная математическая модель системы "транспортное средство - манипулятор". Уравнения динамики аппарата выведены с помощью метода Воронца, что позволило учесть неголономные связи шасси. По уравнениям линейного приближения исследованы частотные свойства и динамические характеристики объекта управления, в том числе взаимное влияние каналов управления.

5. Выполнен синтез локальных регуляторов приводов

транспортного средства, проведено исследование устойчивости системы в целом. Сформулированы рекомендации по исследованию динамики и синтезу системы управления ММР.

6. Разработан пакет прикладных программ, который позволяет моделировать процессы управления и исследовать динамику системы "транспортное средство - манипулятор", в том числе качество управления, устойчивость системы в целом, взаимовлияние каналов управления и др.

7. Спроектирован и создан экспериментальный образец мобильного робота. Выполнены экспериментальные исследования системы управления по определению скоростей и минимальных радиусов поворота из условия обеспечения заданных параметров движения.

Сформулированы рекомендации по проектированию транспортных средств и их систем управления.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Лакота Н. А., Шведов В. Н., Шведов В. В. Синтез алгоритмов управления движением мобильного робота. // Оборонная техника. - 1992. - N7-8. - С. 11-14.

2. Лакота Н. А., Шведов В. В. Синтез алгоритмов движения колесного мобильного робота. // Актуальные проблемы фундаментальных наук: Сборник докладов международной научно-технической конференции. - М.: МГТУ, 1991. - Т. 11. - С. 53-56.

3. Шведов В. В. Управление движением мобильного робота в автоматическом режиме. // Известия ВУЗов. Машиностроение. - М.: МГТУ, 1993. - N-1. - С. 96-102.

4. Шведов В. Н., Шведов В. В. Управление мобильным манипуляционным роботом по вектору скорости. // Проблемы машиностроения и автоматизации. - 1992. - N3. - С. 28-34.

---

*Подано в печать 20.09.93, 5 экз. 504*

Объем 1 п. л.

Тираж 100 экз.

Ротапринт МГТУ