

На правах рукописи
УДК 621.865.8

СЕРЕБРЕННЫЙ Владимир Валерьевич

**ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОБИЛЬНОГО
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА КАК СЛОЖНОЙ
МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ.**

05.02.05. Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2002

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научные руководители: доктор технических наук, профессор

КУЛЕШОВ В.С.

кандидат технических наук, доцент

РУБЦОВ И.В.

Официальные оппоненты:

доктор техн. наук, проф.

ПОДУРАЕВ Ю.В.

кандидат техн. наук

ХРУЩЕВ В.С.

Ведущая организация:

Тульский филиал КБМ

от " 1 " октября 2002 г. на

Д212.141.02 Московского

имени Н.Э. Баумана по адресу:

, дом 5.

заверенные гербовой печатью,

библиотеке МГТУ имени Н.Э.

2002 г.

15-85601


Иванов В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время всё большее внимание уделяется созданию мобильных безэкипажных машин, выполняющих различные военные задачи. Это обусловлено стремлением снизить потери в живой силе, компенсировать недостаточность личного состава, минимизировать влияние «человеческого фактора», а также перейти к новым технологическим решениям ведения военных действий.

В настоящее время известны и получили широкое распространение различные типы колесных робототехнических комплексов (КРТК). Наиболее известны типы КРТК, управление направлением движения которых осуществляется поворотом одной (несколькими) парами колес. В условиях относительно низкого сопротивления прямолинейному движению, высокого сцепления и на скоростях много ниже критических, такие способы управления однозначно определяют траекторию движения машины.

Однако, в некоторых случаях, например, при эксплуатации на пересеченной местности, целесообразным является применение КРТК на базе сочлененной колесной машины (РТК СКМ). Управление направлением движения такой машины осуществляется путем изменения угла между сопряженными звеньями. В этом случае кинематической однозначности достичь не удастся, так как массы обоих звеньев сопоставимы и их положение в пространстве зависит от многих нелинейных факторов (тяговые силы, силы сопротивления движению, силы, возникающие в узле сочленения, неравномерные нагрузки по колесам и др.).

В этой связи применение существующих систем автоматизированного управления движением представляется затруднительным и необходима разработка такой системы управления движением РТК СКМ, которая способна функционировать в условиях неоднозначной реакции машины на управляющие воздействия.

Таким образом, исследования характеристик криволинейного движения динамической модели РТК СКМ для дальнейшего проектирования системы управления движением представляется актуальным.

Цели и задачи. Целью настоящей работы является развитие методов проектирования системы управления движением РТК СКМ, функционирующей в условиях случайных возмущений от внешней среды. Для достижения этой цели в работе решены следующие основные задачи:

- создана математическая модель мобильного робототехнического комплекса на базе сочлененной колесной машины,
- разработана модель внешних возмущений,
- проведены экспериментальные исследования с целью проверки адекватности математической модели,
- разработан алгоритм управления поворотом РТК СКМ.

Научная новизна. В работе были созданы оригинальная динамическая модель сложной мехатронной системы – РТК СКМ и модель внешних возмущений, разработано математическое и алгоритмическое обеспечение системы управления движением РТК СКМ на основе математической модели движения РТК СКМ, разработан специализированный алгоритм управления направлением движения РТК СКМ.

Практическая ценность работы. На основе результатов выполненных исследований для практического использования при проектировании систем управления движением РТК СКМ предложен комплекс программ для ЭВМ, использование которого позволит имитировать динамику криволинейного движения РТК СКМ по заданной траектории в условиях случайного воздействия внешней среды.

Реализация результатов работы. Материалы диссертационной работы являются основными по разделу научно-исследовательской работы, выполненной в НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана и посвященной вопросам создания систем управления криволинейным движением РТК СКМ.

Апробация работы и публикации. По материалам диссертации опубликовано четыре научные работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на международной научно-технической конференции «Кибернетика и технологии XXI века» (г. Воронеж, ВГУ 2001г.), а так же на научно-технических семинарах в отделе СМ4-4 НИИ СМ и на кафедре "Специальная робототехника и мехатроника" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы. Работа изложена на 133 листах машинописного текста, содержит 56 рисунков и 4 таблицы. Библиография работы содержит 42 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность развития методов проектирования системы управления движением РТК СКМ,

функционирующей в условиях случайных возмущений от внешней среды с использованием имитационной динамической модели и приведено краткое содержание выполненных исследований.

В первой главе приведен обзор безэкипажных мобильных РТК, проектируемых для применения в военных нуждах. Выполнен анализ работ, посвященных созданию математических моделей движения мобильных РТК, и в частности РТК СКМ. Рассмотрены способы управления мобильными РТК. Дан обзор основных теоретических методов применяемых для синтеза дорожно-грунтовых условий, прогнозирования режимов движения КМ, рассмотрены основные преимущества и недостатки современных математических моделей как криволинейного, так и прямолинейного движения. Исследованы современные системы автоматического управления автоматизированными транспортными средствами, выявлены общие недостатки, присущие этим системам. Освещен вопрос математического моделирования систем управления движением автоматизированного транспортного средства.

Отмечается, что основные вопросы, связанные с проектированием систем управления движением колесных РТК освещены в работах Е.Ю. Малиновского, М.М. Гайцгори, С.Ф. Бурдакова, И.В. Мирошника, Р.Э. Стельмакова и трудах научных школ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИПМ РАН, СПБИТМО, НИИИ 38 МО РФ.

Показано, что математическое моделирование является одним из наиболее эффективных способов исследования динамики движения РТК СКМ и реакции машины на управляющие воздействия. Вычислительный эксперимент, проведенный на этапе проектирования, позволяет прогнозировать поведение будущего РТК СКМ в различных условиях эксплуатации, исследовать реакцию машины на моделируемое управляющее воздействие, провести поиск закона управления РТК СКМ.

На основе анализа существующих работ сформулированы основные задачи исследования:

- Разработать математическую модель, в которой учесть необходимые конструктивные параметры РТК СКМ влияющие на динамику криволинейного движения. Для этого: рассмотреть движение РТК СКМ как движение системы связанных тел, каждая из которых имеет шесть степеней свободы;
- Промоделировать реализации случайного рельефа местности на основе неканонических представлений по траектории движения РТК СКМ.

- Разработать систему управления направлением движения РТК СКМ;
- Провести эксперимент с целью проверки адекватности математической модели.

Вторая глава посвящена вопросам построения математической модели РТК СКМ и моделирования внешних воздействий со стороны опорной поверхности. Анализируются свойства наиболее общей динамической модели и на этой основе строятся упрощенные кинематическая и динамическая модели, пригодные для решения различных задач моделирования и управления.

Исходя из перечня решаемых задач, сформулированы следующие требования к математической модели:

- моделирование движения РТК СКМ должно производиться по трем угловым и трем линейным координатам для каждой секции;
- в модели должно быть учтено влияние характеристик ходовой части РТК СКМ на параметры криволинейного движения;
- модель должна описывать совместную динамику корпуса, силовой установки и ходовой части РТК СКМ с точностью, необходимой для оценки работоспособности системы управления и исследования законов управления;
- в модели должны быть учтены неударяющий и неголономный характер связей, наложенных на РТК СКМ;
- в модели не должно накладываться ограничений на характеристики профиля трассы в вертикальной плоскости, что позволит исследовать поведение машины как при движении по реальным неровностям, так и через искусственные препятствия.

Основные допущения, принятые при создании математической модели:

- отсутствует тангенциальная и боковая податливости шины;
- контакт с опорной поверхностью происходит по плоскости;
- корпуса секций РТК СКМ жесткие.

Одним из важных агрегатов РТК СКМ является узел сочленения (УС), по типу которого можно классифицировать любые сочлененные машины. В моделях, где взаимодействие между секциями описано кинематическим способом и УС представляется абсолютно жестким, не представляется возможным получение результатов, связанных с нагруженностью и долговечностью УС, без дополнительных математических выкладок.

В связи с этим рассматривается силовое взаимодействие между секциями, что позволяет решать более широкий круг задач связанный как с движением РТК СКМ, так и с нагруженностью самого УС.

На основании анализа известных УС РТК СКМ в работе сделан вывод о необходимости их классификации как по наличию (или отсутствию) в нем угловых степеней свободы, так и по наличию (или отсутствию) в них управляющего воздействия.

Переход от кинематического взаимодействия между секциями РТК СКМ к силовому происходит следующим образом:

- условно разделяем РТК СКМ в УС на две секции;
- заменяем отброшенную секцию соответствующими силами и моментами;
- моделируем движение каждой секции РТК СКМ по отдельности с учетом сил и моментов в УС. Возникающие в УС силы и моменты пропорциональны взаимному положению секций с учетом закона управления складывания секций.

Такой подход позволяет:

а) использовать для РТК СКМ все наработки, связанные с исследованием криволинейного движения колесных машин;

б) получить универсальную модель для исследования N-секционной РТК СКМ;

в) математически описать универсальный УС, подходящий для любой РТК СКМ;

г) в рамках объектно-ориентированного моделирования существенно упростить представление динамики движения и уменьшить число операторов в программе.

В этом случае расчетная схема примет вид, представленный на рис.1.

Процесс численного детерминистического моделирования можно представить в виде следующего пошагового алгоритма.

Так как в момент времени t_i известны векторы перемещения x_i и скорости $\dot{x}_i$ механической системы (начальные условия шага моделирования) в проекциях на неподвижную систему координат (НСК), то в этот момент времени по известным зависимостям могут быть вычислены значения активных силовых факторов действующих на секцию в НСК. Далее, используя уравнения перехода и направляющих косинусов, осуществляется переход из НСК в подвижную систему координат (ПСК), в которой затем определяются по уравнениям динамики временные производные высших порядков по независимым координатам. Используя уравнения перехода с транспонированной матрицей направляющих косинусов, осуществляется переход из ПСК в НСК по ускорениям, значения которых используются в численном методе и служат для определения положения и скорости системы в момент времени $t_{i+1} = t_i + h$, где h – шаг моделирования по времени. Полученные

значения x_{i+1} и $\dot{x}_{i+1}$ являются начальными условиями на $i+1$ шаге. Алгоритм моделирования показан на рисунке 2.

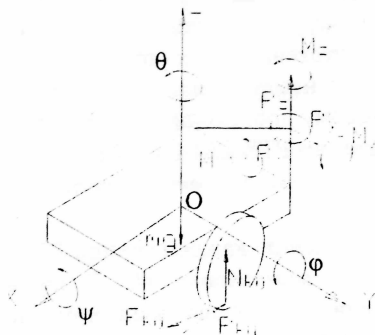


Рис. 1. Расчетная схема криволинейного движения РТК СКМ.

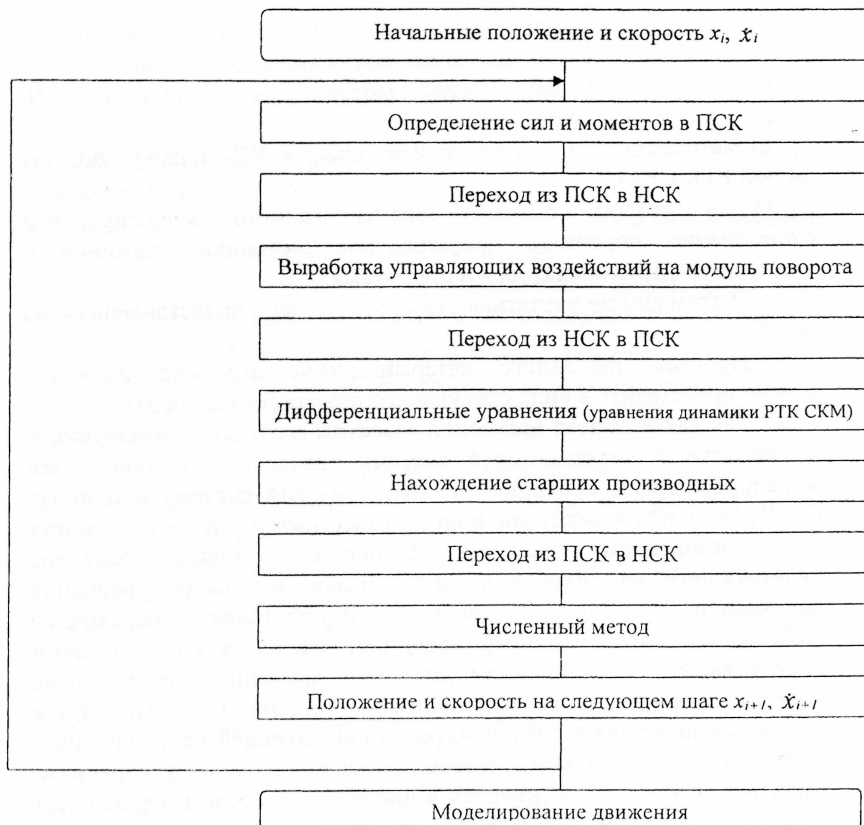


Рис. 2. Алгоритм численного моделирования.

Основываясь на приведенной расчетной схеме и используя теоремы об изменении количества движения тела и момента количества движения тела в проекциях на оси $OXYZ$, получим систему дифференциальных уравнений, записанной для подвижной системы координат.

$$\left\{ \begin{aligned} m\dot{V}_X + m\omega_Y V_Z - m\omega_Z V_Y &= mg_X + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 N_{Xij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 F_{Xij} + \sum_{j=1}^2 P_{Xj} + R_X \\ m\dot{V}_Y + m\omega_Z V_X - m\omega_X V_Z &= mg_Y + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 N_{Yij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 F_{Yij} + \sum_{j=1}^2 P_{Yj} + R_Y \\ m\dot{V}_Z + m\omega_X V_Y - m\omega_Y V_X &= mg_Z + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 N_{Zij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 F_{Zij} + \sum_{j=1}^2 P_{Zj} + R_Z \\ I_X \dot{\omega}_X + \omega_Y \omega_Z I_Z - \omega_Y \omega_Z I_Y &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_X(N_{ij}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_X(F_{ij}) + \sum_{j=1}^2 M_X(P) + M_X + \\ &\quad + M_X(R_X) + M_X(R_Y) + M_X(R_Z) \\ I_Y \dot{\omega}_Y + \omega_X \omega_Z I_X - \omega_X \omega_Z I_Z &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_Y(N_{ij}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_Y(F_{ij}) + \sum_{j=1}^2 M_Y(P) + M_Y + \\ &\quad + M_Y(R_X) + M_Y(R_Y) + M_Y(R_Z) \\ I_Z \dot{\omega}_Z + \omega_X \omega_Y I_Y - \omega_X \omega_Y I_X &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_Z(N_{ij}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_Z(F_{ij}) + \sum_{j=1}^2 M_Z(P) + M_Z + \\ &\quad + M_Z(R_X) + M_Z(R_Y) + M_Z(R_Z) \end{aligned} \right.$$

где:

Nk_{ij} – проекция сил реакции грунта под i -м колесом j -го борта секции на соответствующие оси координат;

Fk_{ij} – проекция сил взаимодействия, реализованная под i -м колесом j -го борта секции на соответствующие оси координат;

Pk – проекция сил сопротивления движению на соответствующие оси координат;

Rk – проекций сил действующих в УС на соответствующие оси координат;

Mk – момент, действующий в УС относительно соответствующих осей координат;

Ik – момент инерции секции РТК СКМ относительно соответствующих осей координат;

ω_k и $\dot{\omega}_k$ – угловая скорость и угловое ускорение секции относительно соответствующих осей координат;

V_k и $\dot{V}_k$ – абсолютные линейные скорость и ускорение ц.м. секции в направлении соответствующих осей координат;

$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 (A)$ – сумма проекций соответствующих сил на оси координат;

$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_k(A)$ – сумма проекций моментов соответствующих сил на оси координат;

составляющие Pf_Y , $M_X(Pf_X)$, $M_X(R_X)$, $M_Y(R_Y)$ и $M_Z(R_Z)$ – равны нулю, так как сила Pf_Y перпендикулярна оси Y , а силы Pf_X , R_X , R_Y и R_Z параллельны соответствующим осям.

Для того чтобы, приведенная система уравнений была замкнутой, к ней необходимо добавить кинематические уравнения, позволяющие проекции угловых скоростей ω_X , ω_Y , ω_Z выразить через углы Эйлера-Крылова – ψ , φ , θ и их производные $\dot{\psi}$, $\dot{\varphi}$, $\dot{\theta}$:

$$\theta = \frac{\omega_Z \cos \varphi - \omega_X \sin \varphi}{\cos \psi}$$

$$\psi = \omega_X \cos \varphi + \omega_Z \sin \varphi$$

$$\varphi = -tg \psi (\omega_Z \cos \varphi - \omega_X \sin \varphi) + \omega_Y$$

Так как процесс моделирования криволинейного движения РТК СКМ происходит в ПСК, а траектория определяется в НСК, введем уравнения перехода из НСК в ПСК и из ПСК в НСК.

Для произвольного вектора скорости (силы, момента и т.д.) покажем переход из ПСК в НСК:

$$V_X = V'_X \alpha_{11} + V'_Y \alpha_{12} + V'_Z \alpha_{13}$$

$$V_Y = V'_X \alpha_{21} + V'_Y \alpha_{22} + V'_Z \alpha_{23}$$

$$V_Z = V'_X \alpha_{31} + V'_Y \alpha_{32} + V'_Z \alpha_{33}$$

где в левой части записаны скорости в НСК, а в правой сумма произведений скорости в ПСК на направляющие косинусы α_{ij} .

Тогда уравнения перехода из НСК в ПСК с использованием транспонирования примут следующий вид:

$$V'_X = \alpha_{11}V_X + \alpha_{21}V_Y + \alpha_{31}V_Z$$

$$V'_Y = \alpha_{12}V_X + \alpha_{22}V_Y + \alpha_{32}V_Z$$

$$V'_Z = \alpha_{13}V_X + \alpha_{23}V_Y + \alpha_{33}V_Z$$

Уравнения направляющих косинусов осей ПСК записываются в следующем виде:

$$\alpha_{11} = \cos \theta \cos \varphi - \sin \psi \sin \varphi \sin \theta$$

$$\alpha_{12} = -\cos \psi \sin \theta$$

$$\alpha_{13} = \sin \varphi \cos \theta + \cos \varphi \sin \psi \sin \theta$$

$$\alpha_{21} = \sin \theta \cos \varphi + \cos \theta \sin \varphi \sin \psi$$

$$\alpha_{22} = \cos \psi \cos \theta$$

$$\alpha_{23} = \sin \varphi \sin \theta - \sin \psi \cos \theta \cos \varphi$$

$$\alpha_{31} = -\cos \psi \sin \varphi$$

$$\alpha_{32} = \sin \psi$$

$$\alpha_{33} = \cos \varphi \cos \psi$$

По приведенным в работе зависимостям вычисляются правые части системы дифференциальных уравнений

Все силовые факторы из правых частей уравнений динамики движения РТК СКМ, являются функциями нормальной реакции грунта N_{ij} под колесом, а, следовательно, определяются в ПСК. Для определения на каждом шаге интегрирования самой нормальной реакции грунта используем ее зависимость от деформации колеса. Уравнения, описывающие динамические процессы в силовой цепи машины позволяют определить скорости вращения колес на каждом шаге интегрирования с учетом как внешних условий движения, так и характеристик силовой цепи.

Разработанный метод позволяет провести комплексную оценку характеристик криволинейного движения РТК СКМ в зависимости от ее конструктивных особенностей на ранней стадии проектирования, а также формировать техническое задание на проектирование вспомогательного оборудования.

В третьей главе, описывается поле внешних воздействий, для наибольшего соответствия модели с поведением реального объекта. В работе рассмотрен вопрос формирования внешних условий движения РТК СКМ, поскольку они, в значительной степени, обуславливают режимы работы робота и являются исходными данными для формирования управляющих воздействий.

Внешнее возмущение на РТК СКМ проявляется через взаимодействие ее ходовой части с опорной поверхностью, которая

характеризуется геометрическими и физико-механическими свойствами. Как правило, физико-механические свойства опорного основания при решении задач моделирования движения машины в целом, выражаются коэффициентом сопротивления прямолинейному движению и коэффициентом взаимодействия. Геометрическая форма опорной поверхности может быть задана высотой неровности в функции пути.

В общем случае, как геометрические, так и физико-механические характеристики носят случайный характер, а значит, их следует рассматривать как реализации случайных функций пути. Таким образом, исходя из поставленной задачи исследования динамики с учетом как прямых, так и тяговых ограничений скорости, моделировалась следующая реализация вектора внешних возмущений:

$$\Phi(x, y) = \begin{bmatrix} z_{rp}(s) \\ f_{rp}(s) \\ \mu(s) \end{bmatrix},$$

где $z_{rp}(s)$ - координата высоты неровности рельефа местности, $f_{rp}(s)$ - коэффициент сопротивления прямолинейному движению, $\mu(s)$ - коэффициент взаимодействия.

Известно, что профиль любой реальной местности в вертикальной плоскости может быть представлен в виде $Z_{zp} = Z_{zp}(x, y)$, где Z_{zp}, x, y - вертикальная и горизонтальные координаты неподвижной декартовой системы координат, связанной с опорной поверхностью. Однако встреча различных участков местности в направлении движения носит случайный характер. Поэтому функцию рельефа местности необходимо рассматривать как реализацию нормальной случайной функции. Процесс моделирования нормального случайного рельефа местности на основе неканонических представлений состоит в моделировании, сложении и усреднении конечного числа реализаций случайной функции, причем с ростом числа реализаций погрешность имитации стремится к нулю. Таким образом, стационарная случайная функция рельефа местности по пути движения каждого колеса может быть записана в следующем виде:

$$Z_{zp}(\tau) = \frac{2 \cdot D_z}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \cos(\omega_j \cdot \tau + \varphi_j),$$

где N - число реализаций случайной функции, ω_j - пространственная частота, φ_j - начальные фазы, D_z - дисперсия стационарной случайной функции рельефа местности.

Таким образом, моделирование одной реализации случайной функции профиля местности состоит из следующих последовательных шагов:

- 1) моделирования φ_1 - начальной фазы случайного процесса с учетом того, что она имеет равномерный закон распределения в интервале $[0, 2\pi]$. Применение метода Монте-Карло позволят, используя случайное число γ_1 равномерно распределенное в интервале $[0,1]$, разыграть по известному закону распределения начальную фазу φ_j
- 2) моделирования пространственной частоты ω , используя закон распределения обобщенной пространственной частоты ω .

Для определения закона распределения обобщенной пространственной частоты ω воспользуемся известными соотношениями теории случайных процессов:

$$S_z(\omega) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} K_z(\delta) \cdot e^{-i\omega\delta} d\delta,$$

где $S_z(\omega)$ - нормированная спектральная плотность распределения пространственной частоты, $K_z(\delta)$ - нормированная корреляционная функция случайного рельефа местности.

На сегодняшний день накоплен большой объем экспериментальных данных по корреляционным функциям микропрофиля дорог для различных регионов. Для определения спектральной плотности пространственной частоты используется наиболее распространенная корреляционная функция вида:

$$K_Z(\delta) = \sum_{j=1}^n A_j e^{-\alpha_j |\delta|} \cos \beta_j \delta, \left(\sum_{j=1}^n A_j = 1 \right)$$

Спектральная плотность пространственной частоты $S_z(\omega)$ примет вид:

$$S_z(\omega) = \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^n A_j \left[\frac{\alpha_j (\alpha_j^2 + \beta_j^2 + \omega^2)}{[\alpha_j^2 + (\beta_j - \omega)^2] \cdot [\alpha_j^2 + (\beta_j + \omega)^2]} \right]$$

Проинтегрировав плотность, получим функцию распределения Φ_ω обобщенной пространственной частоты.

$$\Phi_\omega = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\pi} \left[\arctg \frac{\omega + \beta}{\alpha} + \arctg \frac{\omega - \beta}{\alpha} \right].$$

Аналогично разыгрыванию фазового сдвига, используя случайное число γ_2 , моделируем случайное значение пространственной частоты ω .

Таким образом, вычисляются случайные величины ω , φ_j , необходимые для получения реализации случайного рельефа местности. Повторив процесс N раз и получив множество

реализаций случайных полей, строим случайную функцию рельефа местности $Z_{zpi}=Z_{zpi}(t)$, с шагом моделирования t .

Известно, что изменение коэффициента сопротивления движению $f_{гр}$ по пути носит случайный характер, а само изменение может быть описано экспоненциальным законом распределения. Следовательно, значение математического ожидания $m(f_{зр})$ будет полностью определять распределение $\Phi(f_{зр})$ коэффициента сопротивления движению по пути.

Большой объем экспериментальных данных по значению $m(f_{зр})$ для дорог и бездорожья различных регионов не содержит информации о процессах изменения коэффициента сопротивления по пути. Моделирование функции $f_{зр}(t)$ заключается в моделировании потока случайной величины $f_{зpi}$ – то есть длины участка s_i в пределах которого значение $f_{зр}$ остается постоянным. При этом предполагается, что функция $f_{зр}$ дискретна, а поток – ординарным, стационарным, с ограниченным последствием.

Методом статистического моделирования, используя известную функцию $\Phi(f_{зр})$ распределения коэффициента сопротивления движению, можно поставить в соответствие каждому факту изменения и величину этого изменения. Для разыгрывания возможного значения случайной величины по ее функции распределения необходимо выбрать случайное число γ , равномерно распределенное на области значений $[0,1]$, и решить относительно $f_{зр}$ уравнение $\Phi(f_{зр})=\gamma$. Примерный вид случайного процесса $f_{зр}(s)$ изображен на рис.3.

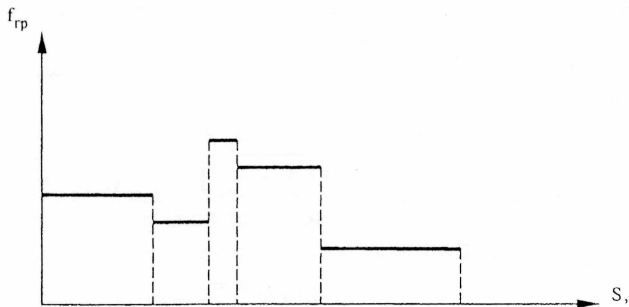


Рис. 3. Примерный вид процесса изменения $f_{гр}$ по пути

Методика математического моделирования коэффициента взаимодействия аналогична моделированию $f_{зр}$, с той лишь разницей, что в отличие от коэффициента сопротивления движению коэффициент взаимодействия имеет равномерный закон распределения. Моделирование происходит в два этапа: на первом

этапе, по известному закону распределения моделируется поток случайной функции по всей траектории, то есть промежутки ΔS между двумя последовательными моментами изменения величины μ_s ; на втором этапе моделируется значение коэффициента μ_s в каждой точке пути с шагом $[\Delta S]$ полученного ранее рельефа местности.

Таким образом, получены все компоненты вектора внешних возмущений, а, следовательно, сформирована среда для моделирования общего случая и прогнозирования режимов движения РТК СКМ.

В четвертой главе рассматривается задача синтеза системы управления траекторным движением и подход к ее решению на примере РТК СКМ «Клавир». Решается задача управления направлением движения. Предложена двухэтапная процедура синтеза, включающая решение задачи силомоментного управления углом слома рамы РТК СКМ. Разрабатывается алгоритм обеспечения движения по заданной траектории.

Синтез системы управления движением РТК СКМ проводится исходя из способа расчета опорной траектории. В данном случае траектория движения задается оператором путем нанесения на карту местности опорных точек и последующей автоматической аппроксимацией. При прохождении РТК СКМ по траектории происходит отклонение положения центра машины (взяв узел сочленения) от заданного. Это отклонение минимизируется путем приложения управляющего момента M_z в шарнире.

Для учета воздействия гидравлической части, в работе проводится численный расчет и находится коэффициент гидравлической жесткости исполнительных механизмов системы управления поворотом РТК СКМ «Клавир».

Решение задачи проектирования современной системы управления колесным РТК предусматривает наличие адекватной математической модели, которая, с одной стороны, достаточно полно описывает поведение робота в процессе его перемещения в рабочем пространстве, а с другой – пригодна для осуществления процедуры синтеза алгоритмов управления.

В данной работе для синтеза системы управления была создана упрощенная динамическая модель, с помощью которой проектировалась система управления. Упрощенная модель не учитывает вертикальных перемещений и динамических перераспределений нагрузок на колеса разных бортов при маневрировании, однако, разработанная с ее помощью система управления так же эффективно работает и на основной модели.

Упрощенная модель описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m\dot{V}_X - m\omega_Z V_Y = mg_X + \sum_{j=1}^2 N_{Xj} + \sum_{j=1}^2 F_{Xj} + \sum_{j=1}^2 P_{Xj} + R_X \\ m\dot{V}_Y + m\omega_Z V_X = mg_Y + \sum_{j=1}^2 N_{Yj} + \sum_{j=1}^2 F_{Yj} + \sum_{j=1}^2 P_{Yj} + R_Y \\ I_Z \dot{\omega}_Z + \omega_X \omega_Y I_Y - \omega_X \omega_Y I_X = \sum_{j=1}^2 M_Z(N_{Yj}) + \sum_{j=1}^2 M_Z(F_{Yj}) + \sum_{j=1}^2 M_Z(P_{Yj}) + M_Z + \\ + M_Z(R_X) + M_Z(R_Y) \end{cases}$$

При синтезе регулятора, для улучшения его динамических свойств и повышения устойчивости системы необходим ввод обратной связи. При проектировании регулятора управления направлением движения РТК СКМ «Клавир» рассматривались обратные связи по скорости и по положению.

Введение обратной связи по скорости изменяет характеристики системы незначительно. При этом на больших углах слома ее применение вообще нецелесообразно, т.к. скорость отработки изменения угла слома исполнительными механизмами системы управления поворотом низкая.

В пятой главе представлены примеры и результаты моделирования управляемого движения РТК СКМ. Адекватность модели подтверждается результатами моделирования характерных режимов движения РТК СКМ при различных условиях сцепления колес с опорным основанием и сопротивлении движению.

Учитывая важность для практики выводов, которые могут быть получены на основании численных экспериментов с использованием предложенной модели управляемого движения РТК СКМ, необходима проверка адекватности и точности модели на основе натурных испытаний машины.

Для доказывания адекватности динамической модели, результаты, полученные с ее помощью, сравнивались с экспериментальными результатами, полученными в ходе ходовых испытаний, проводимых с прототипом РТК СКМ «Клавир».

Были отработаны типовые траектории. Данные ходовых испытаний сравнивались с данными, полученными аналитическим путем с помощью математической модели. Относительное расхождение результатов на совокупности условий не превосходит: по максимальным отклонениям положения узла сочленения – 13% от габаритного размера по ширине, доказывая адекватность модели.

Проводя теоретические исследования криволинейного движения РТК СКМ, необходимо ориентироваться, прежде всего, на такие виды и режимы испытаний, которые используются для автотранспортных средств.

Проведенное моделирование отработки РТК СКМ типовых маршрутов движения «переставка» и «движение по окружности $r=25$ м.» показало, что регулятор, разработанный на упрощенной модели, управляет движением полной модели РТК СКМ на скоростях до 20 км/ч без значительных расхождений. Максимальное отклонение от угловых точек траектории при скорости 20 км/ч составляет не более 21%, а на прямолинейных участках трассы – 12%, что находится в заданных пределах.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана новая математическая модель движения РТК СКМ, которая является основой для проектирования системы управления движением. В модели учитывается неудерживающий и неголономный характер связей, наложенных на машину, что дает возможность моделировать поведение объекта при наличии юза и буксования и отрыва колес от опорной поверхности, с учетом нелинейных характеристик РТК СКМ и грунта. Использование математической модели позволит сократить время на разработку и доводочные испытания СКМ.
2. Показано, что использование уравнений динамики РТК СКМ в подвижной системе координат позволяет отказаться от ряда известных допущений и, тем самым, повысить адекватность и точность описания общего случая движения машины.
3. Установлено, что использование метода неканонических представлений случайной функции для моделирования рельефа местности по траектории движения, эффективно, для решения задач связанных с теоретическими исследованиями систем управления.
4. Полученные статистические характеристики вертикальных ускорений корпуса РТК СКМ позволяют формировать технические требования к оборудованию, крепящемуся к корпусу РТК СКМ, а также выполнять динамический расчет узлов и агрегатов работа на прочность.
5. Результаты расчетов при криволинейном движении по неровностям согласуются с экспериментальными данными на всех исследуемых скоростях с точностью, приемлемой для решения задачи управления движением РТК СКМ. Максимальное

отклонение от траектории при скорости 20 км/ч составляет 21%, а при скорости 10 км/ч – 12%.

6. Теоретическими исследованиями доказана возможность применения предложенного алгоритма управления направлением движения РТК СКМ. Установлено, что регулятор, синтезированный с помощью упрощенной модели, пригоден для управления полной моделью.
7. На примере РТК СКМ «Клавир» показана возможность создания алгоритма управления движением с использованием динамической модели СКМ и математической модели внешних возмущений.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Кулешов В.С., Котиев Г.О., Серебранный В.В. Управление мобильным робототехническим комплексом на базе двузвенной сочлененной машины. // Кибернетика и технологии XXI века: материалы международной конференции – Воронеж,- 2001.- С. 615-623.
2. Мехатронные средства для автоматизации современных и перспективных роботизированных специальных систем: Научно-технический отчет / НИИ Специального Машиностроения. Руководитель темы Рубцов И.В. – М., 2001.- 68 с.
3. Серебранный В.В. Моделирование робототехнического комплекса на базе двузвенной сочлененной машины // Мехатроника.- 2002.- №1.- С. 11-16.
4. Исследование характеристик криволинейного движения мобильного робототехнического комплекса / В.В.Серебранный, Г.О.Котиев, И.В.Рубцов и др. // Мехатроника. Автоматизация управления.- 2002.- №4.- С. 21-35.

Подписано в печать /2.08.02 г.

Заказ 38, объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.

Типография МГТУ им. Н. Э. Баумана