

ХУСНУТДИНОВ Дим Зинфирович

**СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ ДВУХЗВЕННЫМИ
ТРАНСПОРТНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИМИ
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Специальность

**05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(промышленность)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Самара – 2018

Работа выполнена на кафедре технической кибернетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» (ФГБОУ ВО «УГАТУ»)

Научный руководитель: – **ИЛЬЯСОВ Барый Галеевич**
д-р. тех. наук, проф., Засл. деят. науки и техн. РФ, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (г. Уфа), профессор кафедры «Техническая кибернетика»

Официальные оппоненты: – **МИХЕЕВА Татьяна Ивановна**
д-р. тех. наук, проф., профессор кафедры «Организация и управление перевозками на транспорте» ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева»

– **ПЕТУХОВ Игорь Валерьевич**
д-р. тех. наук, проф., проректор по развитию университетского комплекса ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», профессор кафедры «Проектирование и производство ЭВС»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Защита диссертации состоится 26 декабря 2018 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.03 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Галактионовская, 141, корп. №6, ауд. №33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Первомайская, д. 18.

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.03; тел. (846) 337-04-43, e-mail: radch@samgtu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета Д 212.217.03, д.т.н.



Зотеев В.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Создание и совершенствование транспортных средств на сегодняшний день является одной из важнейших проблем как для современной науки, так и для экономики страны. Особенно это касается авиапромышленности, судостроения и военной техники. Все перечисленные виды транспорта эксплуатируются в тяжелых климатических условиях. К числу перечисленных видов транспорта без колебаний можно отнести мобильные двухзвенные транспортные механизмы, эксплуатируемые в жестких условиях крайнего севера и тундры. Двухзвенные транспортные механизмы (ДТМ) предназначены для работы в суровых погодных условиях на грунтах с низкой несущей способностью (болото, снежная целина, бездорожье, пересеченная лесная местность и т. д.) при температуре окружающей среды от плюс 40 °С до минус 50 °С, что создает условия неопределенности в эксплуатации этих транспортных средств.

Развитие науки и техники в области информационных технологий дает новые возможности в управлении сложными техническими объектами, в том числе и мобильными ДТМ. В настоящее время имеется достаточно хорошая теоретическая база для создания систем управления мобильными многозвенными транспортными механизмами. Однако в прикладном плане эта задача решена неудовлетворительно в связи с встречающимися на практике трудностями внедрения систем управления мобильными многозвенными транспортными механизмами. Эти проблемы обусловлены как их конструктивными особенностями, так и условиями эксплуатации.

Объектом исследования является система управления мобильными двухзвенными транспортными механизмами.

Предмет исследования. Методы структурно-параметрического синтеза системы автоматического управления мобильным двухзвенным транспортным механизмом.

Методы исследования базируются на методах системного анализа с применением современного аппарата интеллектуальных систем управления, методов имитационного моделирования, численных и натуральных экспериментов и логических средствах обработки информации.

Цель работы. Разработка и реализация алгоритмов и систем управления мобильными двухзвенными транспортными механизмами, функционирующими в условиях неопределенности.

Основные задачи исследования.

1. Построение моделей движения мобильного ДТМ как объекта автоматического управления.
2. Разработка методики построения и декомпозиции системы автоматического управления движением ДТМ.
3. Структурно-параметрический синтез детерминированных и не полностью определенных подсистем управления движением ДТМ.
4. Разработка специального математического, алгоритмического и

программного обеспечения для реализации систем автоматического управления движением ДТМ.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Предложены модели управления мобильным двухзвенным транспортным механизмом, отличающиеся от известного его структурного представления в качестве однозвенного объекта, осуществляющего плоскопараллельное движение.

2. Разработанная методика структурного синтеза системы управления движением ДТМ предусматривает её декомпозицию на автономные детерминированные и неполностью определенные подсистемы, функционирующие соответственно в штатном режиме работы объекта и в условиях воздействия опасных возмущений.

3. Методика структурно-параметрического синтеза отдельных подсистем управления движением ДТМ, отличающаяся от известных аналогов способами построения детерминированных обратных связей и нечетких логических алгоритмов в контуре компенсации возмущающих воздействий.

Практическая значимость. Результаты диссертационной работы использовались в АО «МК «Витязь» при:

- 1) подготовке технического задания на разработку и изготовление автоматической гидравлической рулевой системы транспортера;
- 2) выборе структурных элементов для автоматической гидравлической рулевой системы транспортера ДТ-10.

Результаты диссертационной работы также используются в учебном процессе при подготовке бакалавров направления 27.03.03 «Системный анализ и управление», 27.03.04 «Управление в технических системах»

Основные результаты исследования, выносимые на защиту:

1. Модели мобильных двухзвенных транспортных механизмов как объекта управления их движением.

2. Метод структурного синтеза и декомпозиции системы автоматического управления движением мобильных двухзвенных транспортных механизмов.

3. Структурно-параметрический синтез детерминированных подсистем управления движением мобильного ДТМ, функционирующих в штатных режимах работы объекта.

4. Структурно-параметрический синтез интеллектуальных подсистем управления движением мобильного ДТМ, функционирующих в условиях воздействия опасных возмущений.

5. Результаты анализа и реализации предлагаемых систем автоматического управления движением мобильных ДТМ.

Достоверность результатов. Обоснованность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается корректным использованием положений теории автоматического управления, теории системного анализа. Диссертационное исследование основывается на применении апробированных методов и научных положений логического

управления, корректном использовании математического аппарата и согласовании полученных результатов с известными теоретическими положениями. Достоверность теоретических положений и выводов подтверждаются результатами имитационного моделирования ДТМ, которые хорошо согласуются с натурными экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научно-технических конференциях, в том числе: Всероссийской научно-технической конференции «Динамика машин и рабочих процессов» (Челябинск, ЮУрГУ, 2012); Всероссийской научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении» (УГАТУ, 2012, 2013, 2014, 2015); Всероссийской научно-технической конференции «Мавлютовские чтения» (Уфа, УГАТУ 2013), Всероссийской научно-технической конференции «Управление большими системами» (Пермь, 2017).

Результаты отдельных этапов и работы в целом обсуждались на научно-технических семинарах кафедры «Техническая кибернетика» УГАТУ и научном семинаре кафедры «Прикладная информатика и информатика» СамГТУ.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, и имеется свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662474 от 11.11.2016г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы, приложения, актов. Содержит 145 страниц машинописного текста, 145 рисунков, 5 таблиц, 7 приложений, 3 акта и библиографический список из 128 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю Ильясову Барью Галеевичу за постановку задач, ценные советы, помощь и поддержку при выполнении научных исследований.

Автор выражает благодарность консультанту диссертационной работы к.т.н., профессору, Чингизу Асхатовичу Яруллину за высококвалифицированные консультации в области управления гидравлическими исполнительными механизмами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, описана проблема, решаемая в работе, сформированы цели и задачи исследования, описаны выносимые на защиту положения, структура и краткое содержание работы по главам.

В первой главе выполнен анализ проблем управления движением двухзвенных транспортных механизмов на плоскости, проведен анализ результатов исследований динамических механизмов, схожих с тематикой работы. Выполнен анализ методик и методов формирования имитационных моделей для исследования движения двухзвенных транспортных механизмов и алгоритмов управления ими. Выполнен анализ технических характеристик двухзвенного гусеничного транспортного механизма типа «Витязь», описаны

особенности поворотного-сцепного устройства и гидравлического рулевого устройства. Поставлены цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена разработке методики анализа мобильного ДТМ как объекта управления и концепции построения его системы управления движением.

Взамен методам исследования, используемым в науке для анализа многосвязных механических объектов движения, в работе предложен метод, позволяющий упростить имитационную модель движения ДТМ. Движение ДТМ можно расчленить на две составляющие. Первая составляющая представляет собой вращательное движение $\alpha(t)$ (рис. 1) звеньев ДТМ относительно друг друга, управляемое гидравлическим рулевым приводом. Вторая составляющая движения представляет собой абсолютное движение ДТМ, в виде поступательного движения двух его сочлененных кинематических звеньев на плоскости.

Особенности конструкции поворотного-сцепного устройства таковы, что плечи сил, развиваемые гидроцилиндрами, действующие на второе звено, больше плеч, действующих на первое звено. Учитывая особенность сцепного устройства, переднее кинематическое звено будем считать неподвижным во вращательном движении.

Все четыре гусеницы ДТМ ведущие. Поэтому при движении по прямой воздействие звеньев друг на друга несущественно. Во время поворота, то есть при угле складывания звеньев больше нуля, сила F_{22} со стороны второго звена на первое возрастает. Если рассматривать первое звено, сила F_{22} действует на шарнир и направлена вдоль оси второго звена (рис. 1). Эта сила стремится увести заднюю часть первого звена в сторону, при этом первое звено совершает поворот, при котором изменяется угловое положение $\varphi(t)$ относительно оси x . Учитывая вышеизложенное, динамикой второго звена при моделировании абсолютного движения транспортного механизма пренебрегаем. Таким образом, движение двухзвенного транспортного механизма сводится к простому плоскопараллельному движению однозвенного, на которое действует сила тяги гусениц F_{21} и поворачивающая первое звено сила F_{22} со стороны второго звена при $\alpha(t)$ больше нуля.

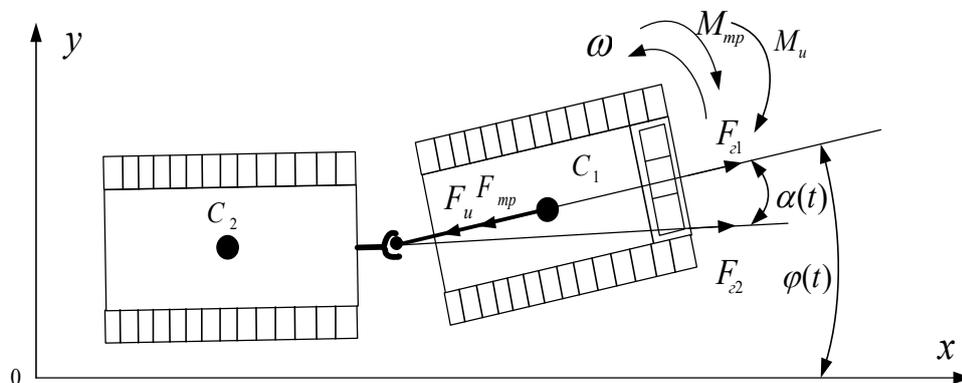


Рисунок 1. Расстановка сил, действующих на переднее звено при повороте.

Выходной сигнал модели первого составляющего движения $\alpha(t)$ будет входом на модель второго составляющего движения.

Концепция построения системы автоматического управления состоит в синтезе систем управления для каждого из расчлененных составляющих движения двухзвенного транспортного механизма (рис. 2 и 3). В качестве наблюдаемых параметров приняты угловое положение $\phi(t)$ транспортного механизма относительно оси x и скорость его движения $V(t)$. Соответственно система управления будет состоять из двух контуров.

Накопленный научный опыт в области управления силовыми гидромеханическими системами обуславливает разработку систем автоматического управления гидравлическим рулевым приводом (САУ ГРП, см. рис. 3) без учета абсолютного движения транспортного средства. Динамика складывания транспортного механизма учитывается в уравнениях гидропривода. Модель движения транспортного механизма, который описывается как свободное плоскопараллельное движение, получает от модели привода рулевого устройства параметр угла складывания звеньев $\alpha(t)$ в качестве входного сигнала в модель движения транспортера. Угол складывания $\alpha(t)$, по сути, рассматривается как угол направления силы со стороны второго кинематического звена транспортного механизма, действующего на шарнир, которая уводит первое звено в сторону от прямолинейного движения.

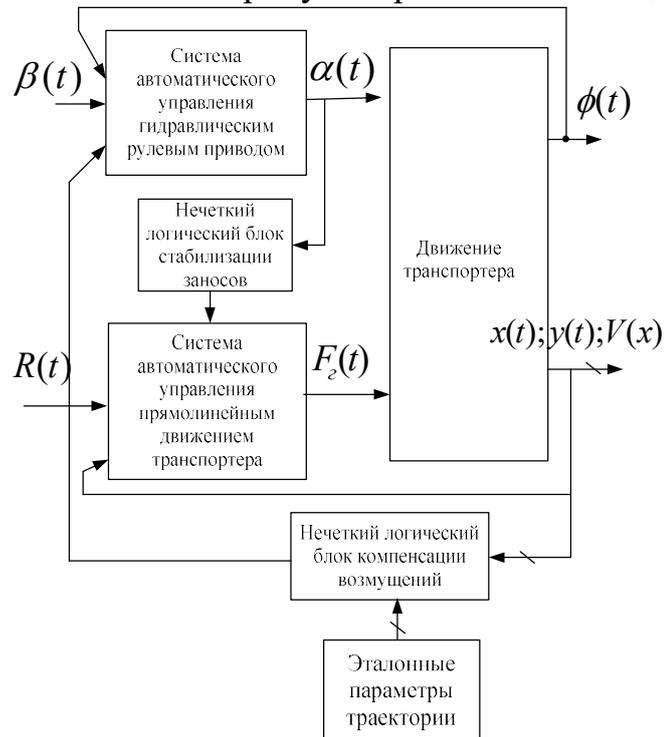


Рисунок 2. Структура системы управления движением ДТМ

Второй контур представляет собой систему автоматического управления прямолинейным движением транспортного механизма (САУ ПД, см. рис. 3) и представляет собой САУ по скорости движения ДТМ $V(t)$ относительно входной силы тяги гусениц $F_{2l}(t)$. Также предлагается замкнуть угловое положение

рулевого колеса $\beta(t)$ обратной связью по угловому положению ДТМ $\phi(t)$ относительно оси x .

Система стабилизации движения ДТМ при заносах основана на введении дополнительных интеллектуальных нечетких блоков. Первый нечеткий блок вносит коррективы в силу тяги гусениц F_{2l} в зависимости от углового положения складывания и ее скорости. Второй нечеткий блок вводится для компенсации опасных возмущающих воздействий при движении ДТМ, который сравнивает параметры траектории транспортного механизма с эталонными и вносит коррективы в угол, выдаваемый задающим устройством $\beta(t)$.

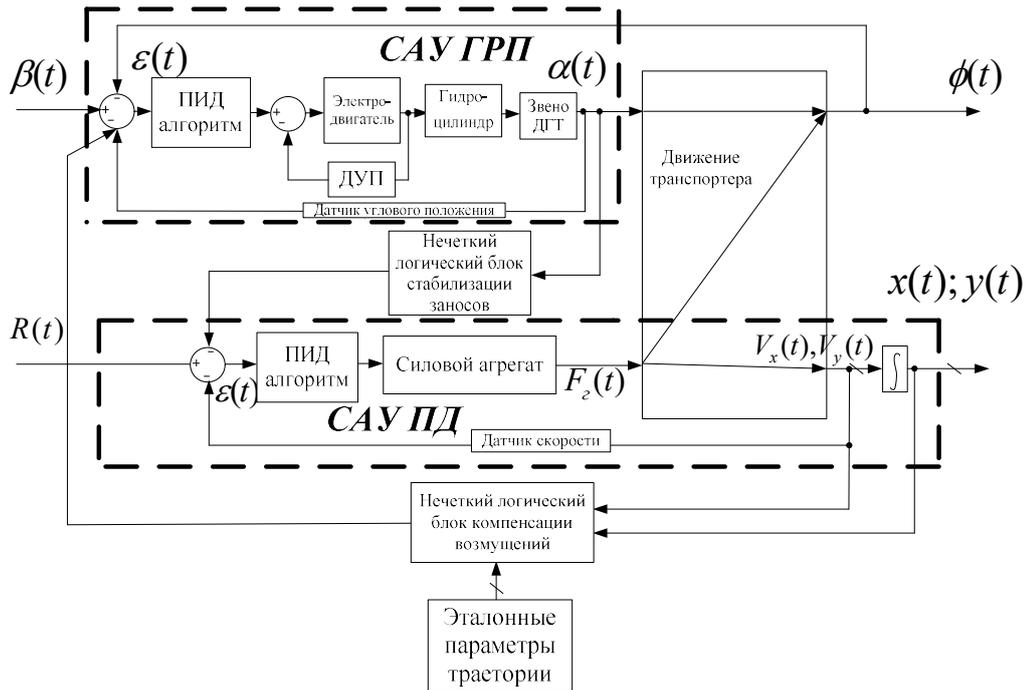


Рисунок 3. Структура системы управления движением ДТМ

Также в данной главе представлены уравнения для имитационной модели движения гидравлического привода руля и движения ДТМ в соответствии предлагаемой концепцией:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 1. J \cdot \frac{d\alpha^2(t)}{dt^2} + \kappa_{mp} \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt} = p_1(t) \cdot r \cdot F_u + p_2(t) \cdot r \cdot F_u, \\
 2. \varepsilon(t) = K_{py} \beta(t) - K_{oc} \alpha(t), \\
 3. J_{\alpha_{\text{эд}}} \frac{d^2 \alpha_{\text{эд}}(t)}{dt^2} + K_{mp\alpha} \cdot \frac{d\alpha_{\text{эд}}(t)}{dt} = K_m \cdot I(t), \\
 4. L \frac{dI(t)}{dt} + R \cdot I(t) + K_a \cdot \frac{d\alpha_{\text{эд}}(t)}{dt} = \varepsilon(t) \cdot K_{yc}, \\
 5. Q_H(t) = F \frac{dx_y(t)}{dt} + \frac{V_y}{B_{\text{жс}}} \cdot \frac{dp_1}{dt} + k_{кл} p_1(t), \\
 6. Q_H(t) = F \frac{dx_x(t)}{dt} - \frac{V_{\text{тш}}}{B_{\text{жс}}} \cdot \frac{dp_2}{dt} - k_{кл} p_2(t), \\
 7. Q_H(t) = K_{Qy} \cdot \alpha_{\text{эд}}(t),
 \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\alpha(t)$ – угол поворота звеньев относительно друг друга; $p_1(t), p_2(t)$ – давление в нагнетательной и сливной полостях; $\beta(t)$ – угол поворота рулевого колеса; $\varepsilon(t)$ – ошибка управления по угловому положению; $\varepsilon(t)$ – ошибка управления по угловому положению; $\alpha_{\partial}(t)$ – угловое положение ротора электродвигателя; $I(t)$ – сила тока в обмотках электродвигателя; $Q_n(t)$ – подача аксиально поршневого насоса; $x_u(t)$ – положение поршня цилиндра; J – момент инерции звена; k_{mp} – коэффициент трения звена при повороте; F_u – площадь силового цилиндра привода; r – расстояние от шарнира до силового цилиндра; K_{oc} – коэффициент передачи обратной связи по угловому положению звеньев относительно друг друга; K_{py} – коэффициент передачи рулевого устройства; J_{∂} – момент инерции ротора электродвигателя; $K_{mp\partial}$ – коэффициент трения ротора двигателя; K_m – механическая постоянная двигателя; L – индуктивность катушки статора двигателя привода; K_{α} – электрическая постоянная двигателя; K_{yc} – коэффициент передачи преобразователя электродвигателя; R – сопротивление обмоток двигателя; V_y, V_{um} – объем полости гидропривода в штоковой и нагнетательной полостях; $B_{ж}$ – модуль упругости жидкости; $k_{кл}$ – коэффициент передачи клапана; K_{Qy} – коэффициент передачи аксиально поршневого насоса.

Система уравнений (1) описывает поворот второго кинематического звена ДТМ относительно первого. Третье и четвертое уравнения системы описывают работу электродвигателя, а пятое, шестое и седьмое уравнения – работу гидравлического привода.

Как и отмечено выше, абсолютное движение ДТМ описывается как плоскопараллельное движение первого звена. Имитационная модель скорректированной системы управления движением ДТМ на плоскости представлена системой уравнений:

$$\begin{cases} 1. m \frac{dx^2(t)}{dt^2} \cos \varphi(t) + k_{mp} \frac{dx^2(t)}{dt^2} \cos \varphi(t) = F_{z1} \cos(\varphi(t) - \alpha(t)), \\ 2. m \frac{dy^2(t)}{dt^2} \sin \varphi(t) + k_{mp} \frac{dy^2(t)}{dt^2} \sin \varphi(t) = F_{z1} \sin(\alpha(t) - \varphi(t)), \\ 3. J \frac{d\varphi^2(t)}{dt^2} + k_{mp} \frac{d\varphi^2(t)}{dt^2} = F_{z2} L \sin \alpha(t), \end{cases} \quad (2)$$

где $x(t)$ – проекция положения транспортера на ось x ; $y(t)$ – проекция положения транспортера на ось y ; $\varphi(t)$ – положение транспортера относительно оси x ; m – масса первого звена транспортера; k_{mp} – коэффициент трения звена при поступательном движении; F_{z1}, F_{z2} – силы тяги гусениц первого и второго звена, соответственно; L – плечо силы, действующий на шарнир поворотного сцепного устройства со стороны второго звена (сила тяги гусениц второго звена); J – момент инерции звена.

Объект имеет два входа: угол складывания кинематических звеньев $\alpha(t)$, и силу тяги гусениц F_{z1} , которая корректируется по скорости движения.

Таким образом, в данной главе описан метод анализа и синтеза системы автоматического управления сложным динамическим объектом, а также получены уравнения объекта движения.

В третьей главе рассматривается разработка системы управления мобильным ДТМ в соответствии с вышеописанной концепцией. Разработаны система управления рулевым приводом, система управления движением ДТМ в нормальных условиях и два нечетких блока для управления движением ДТМ в условиях неопределенности.

Структура системы автоматического управления рулевым приводом представлена на рисунке 4.

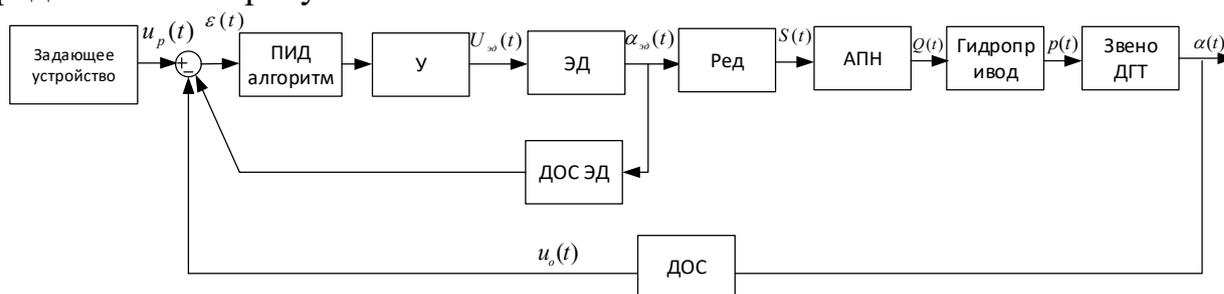


Рисунок 4. Система автоматического управления поворотами:

У – усилитель, ЭД – электродвигатель, Ред. – редуктор, АПН – аксиально – поршневой насос, Дос ЭД – датчик обратной связи по положению вала электродвигателя, Дос – датчик обратной связи углового положения звеньев относительно друг друга

Исходную систему с обратной связью по углу складывания транспортного механизма предлагается скорректировать посредством дополнительной местной обратной связи и ПИД алгоритма. Анализ системы управления на основе расчета модели привода показывает эффективность предлагаемых структурных решений.

Схемы включения интеллектуальных блоков поддержки системы управления, основанных на нечеткой логике, представлены на структурной схеме всей системы (рис. 5).

Система компенсационного интеллектуального управления (НЛ-1) при возмущениях ДТМ принимает решения о корректирующем сигнале на основе величины и скорости отклонения ДТМ от заданной траектории. В вычислительных экспериментах выдачу заданной траектории движения выполняет некоторая невозмущенная модель объекта управления (НМОУ). Блок НЛ-1 сравнивает эталонные и реальные кривые и выполняет коррекцию углового положения рулевого задающего сигнала $\beta(t)$.

Система компенсационного интеллектуального управления при возмущениях транспортного механизма основана на логике поведения эксперта-водителя. Принятие решения о коррекции движения отклонившегося транспортного средства водитель-эксперт выполняет по расстоянию до заданной траектории по линии, перпендикулярной направлению движения.

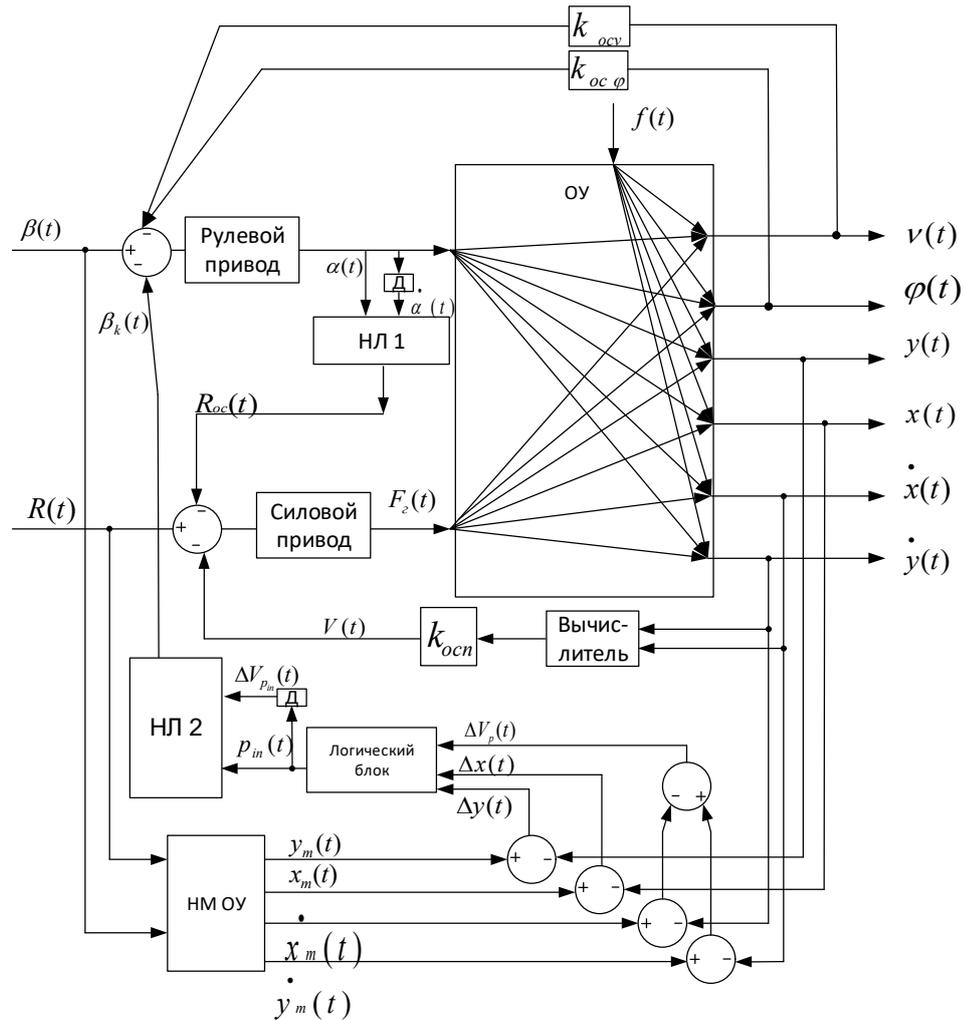


Рисунок 5. Структура системы управления.

В соответствии со знаниями эксперта коррекцию предлагается проводить по значению отклонения Δx (проекция разности фактического и заданного положения на ось x) или Δy (проекция разности фактического и заданного положения на ось y). При этом коррекция выполняется по Δx , если движение происходит «больше» в направлении оси y . Коррекция выполняется по Δy , если движение происходит «больше» в направлении по оси x .

Информацию о направлении движения транспортера можно получить по знаку некоторого параметра $\Delta V_p(t)$, вычисляемого по проекциям скоростей на оси посредством выражения, задаваемого ниже соотношением (3).

На рисунках 6 и 7 схематично представлены траектории, иллюстрирующие алгоритм определения параметра, по которому ведётся коррекция. Заданная траектория движения ДТМ задана в виде кривой «З», положение ДТМ на которой определяется координатами $(x^3(t), y^3(t))$. По заданной кривой можно определить заданную скорость движения $\Delta V^3(t)$. Отклоняясь, ДТМ имеет фактические (см. кривую «Ф», рис. 5 и 6) координаты $(x^\phi(t), y^\phi(t))$ и скорость $\Delta V^\phi(t)$. Являясь векторными величинами, данные скорости проецируются на оси координат: фактические, как $V_x^\phi(t)$ и $V_y^\phi(t)$, заданные, как $V_x^3(t)$ и $V_y^3(t)$. При

этом решение, по какому из перечисленных параметров проводить коррекцию, принимается по знаку параметра, определяемому по выражению:

$$\Delta V_p(t) = \Delta V_x(t) - \Delta V_y(t) = (V_x^3(t) - V_x^\phi(t)) - (V_y^3(t) - V_y^\phi(t)). \quad (3)$$

Если знак $\Delta V_p(t)$ в (3) положительный, то коррекция проводится по Δx , а если знак $\Delta V_p(t)$ отрицательный, то коррекция проводится по Δy . Алгоритм выбора параметров коррекции по выражению (3) выполняется в логическом блоке системы (см. рис. 5).

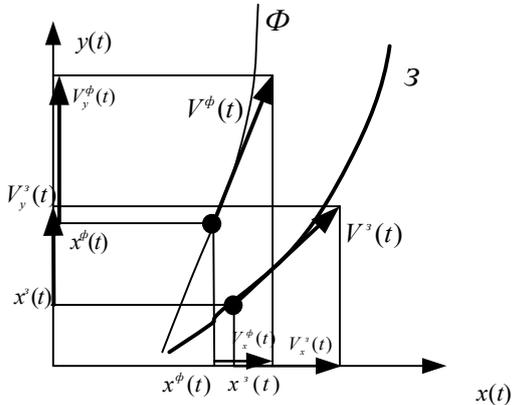


Рисунок 6. Ситуация отклонения ДТМ от заданного маршрута при $\Delta V_p(t) > 0$.

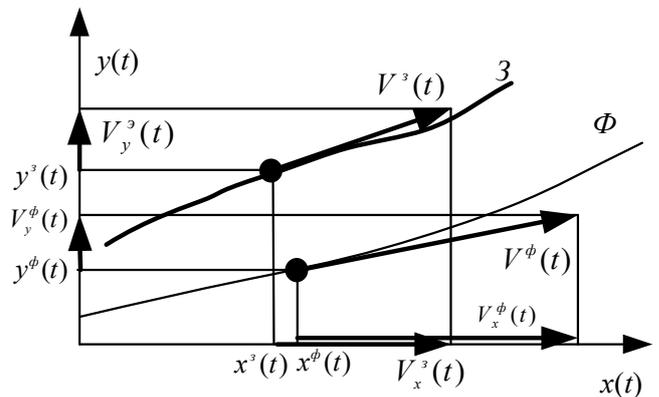


Рисунок 7. Ситуация отклонения ДТМ от заданного маршрута при $\Delta V_p(t) < 0$.

На рисунке 8 представлены лингвистические переменные системы компенсации заносов, где P_{in} – параметр, по которому ведется коррекция, V_{in} – скорость его изменения, $\beta(t)$ – сигнал коррекции. База нечетких правил системы компенсации опасных возмущений представлена в таблице 1.

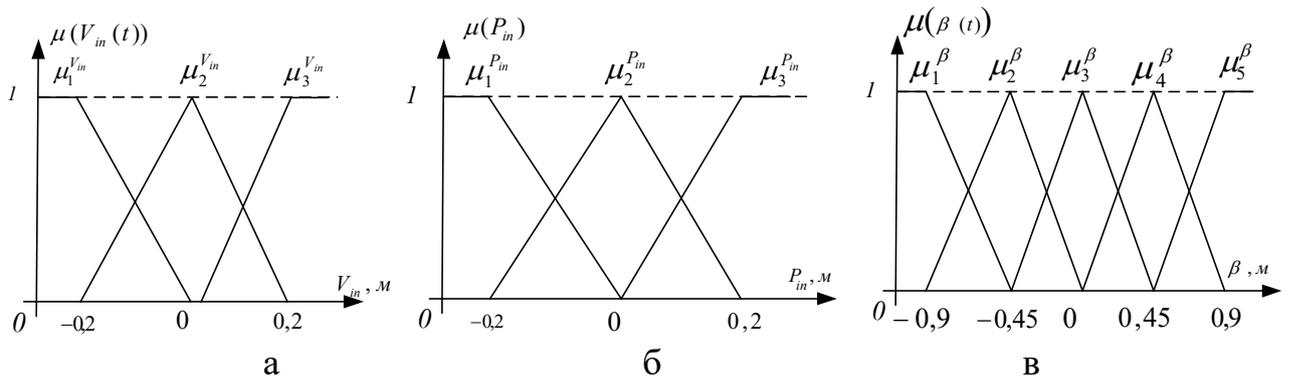


Рисунок 8. Лингвистические переменные: а) «скорость отклонения», б) «величина отклонения», в) «сигнал коррекции»

На рисунке 9 представлены лингвистические переменные системы компенсации заносов, где α – угловое положение звеньев относительно друг друга, $d\alpha/dt$ – угловая скорость движения звеньев относительно друг друга, V_{in} – скорость его изменения, $F_n(t)$ – величина коррекция скорости ДТМ по пропорциональному каналу, $F_\delta(t)$ – величина коррекция скорости ДТМ по дифференциальному каналу.

Таблица 1. База нечетких правил системы компенсации опасных возмущений

	Отклонение P_{in}			скорость отклонения ΔV_{in}			корректирующий угол β	
	$\mu_1^{P_{in}}$	отрицательное		$\mu_1^{\Delta V}$	отрицательная		μ_1^β	отрицательный большой
Если	$\mu_2^{P_{in}}$	нулевое	и	$\mu_1^{\Delta V}$	нулевая	то	μ_3^β	нулевой
	$\mu_3^{P_{in}}$	положительное		$\mu_1^{\Delta V}$	положительная		μ_4^β	положительный малый
	$\mu_1^{P_{in}}$	отрицательное		$\mu_2^{\Delta V}$	отрицательная		μ_2^β	отрицательный большой
	$\mu_2^{P_{in}}$	нулевое		$\mu_2^{\Delta V}$	нулевая		μ_3^β	нулевой
	$\mu_3^{P_{in}}$	положительное		$\mu_2^{\Delta V}$	положительная		μ_4^β	положительный малый
	$\mu_1^{P_{in}}$	отрицательное		$\mu_3^{\Delta V}$	отрицательная		μ_2^β	отрицательный большой
	$\mu_2^{P_{in}}$	нулевое		$\mu_3^{\Delta V}$	нулевая		μ_4^β	нулевой
	$\mu_3^{P_{in}}$	положительное		$\mu_3^{\Delta V}$	положительная		μ_5^β	положительный малый

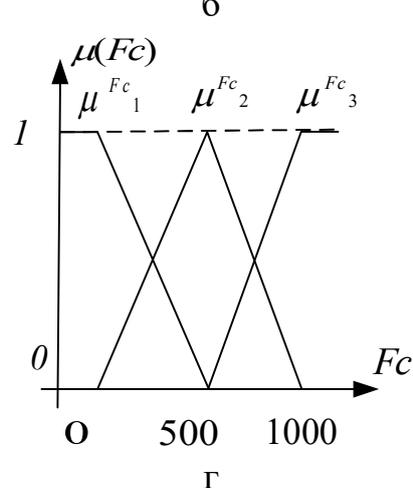
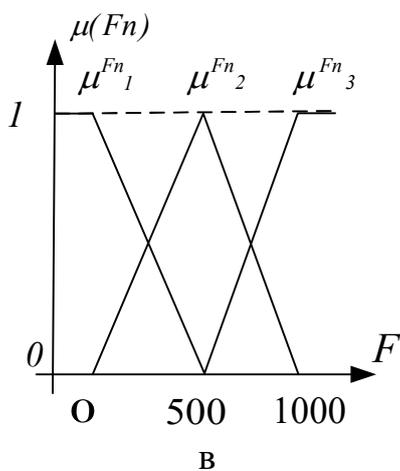
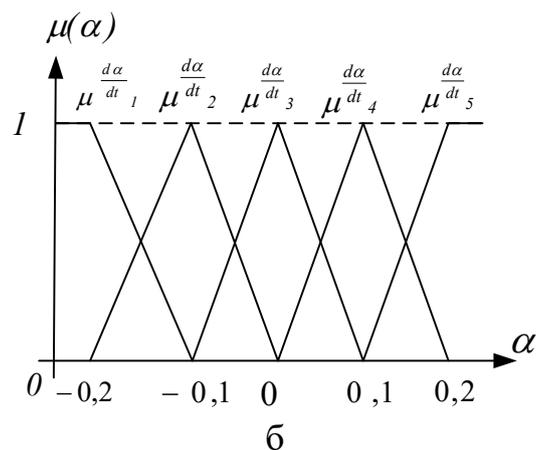
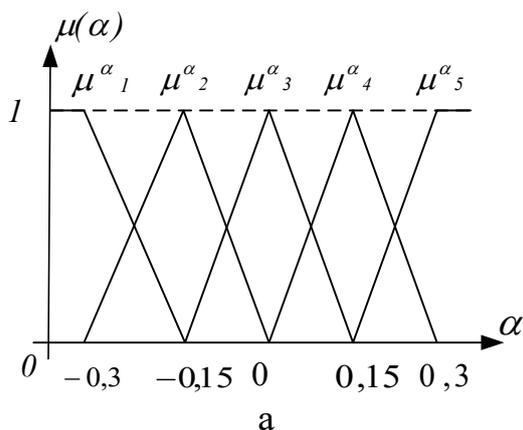


Рисунок 9. Лингвистические переменные: а) «угол складывания звеньев», б) «скорость угла складывания звеньев», в) «сила обратной связи по пропорциональному каналу» г) «сила обратной связи по каналу скорости»

База правил системы, представленная в таблице 2, предусматривает корректирующие воздействие как по углу складывания звеньев, так и по скорости отклонения ДТМ от заданной траектории. Система стабилизации ДТМ при заносах (НЛ – 2, рис. 5) обеспечивает снижение скорости двухзвенного транспортного механизма в возвратно-поступательном движении при увеличении по модулю углового положения звеньев относительно друг друга и скорости изменения этого положения.

Таблица 2. База правил нечеткой системы стабилизации заносов ДТМ

№	Угол складывания звеньев	Сила обратной связи по пропорциональному каналу	
1	«угол нулевой»		«сила малая»
2	«угол положительный малый» или «угол отрицательный малый»		«сила средняя»
3	«угол отрицательный большой» или «угол положительный большой»		«сила большая»
№	Скорость угла складывания звеньев	Сила обратной связи по каналу скорости	
1	«скорость нулевая»		«сила малая»
2	«скорость положительная малая» или «скорость отрицательная малая»		«сила средняя»
3	«скорость отрицательная большая» или «скорость положительная большая»		«сила большая»

Таким образом, в главе описан синтез системы автоматического управления гусеничным ДТМ. Составлена структура системы автоматического управления для функционирования транспортного механизма в нормальных условиях, а также составлены блоки интеллектуального логического управления для функционирования транспортного механизма в условиях неопределенности.

В четвертой главе разработано программное обеспечение и выполнены численные и натурные эксперименты, обсуждение результатов, на основе которых совершен анализ эффективности и адекватности системы управления движением ДТМ.

В четвертой главе решаются четыре задачи: 1) обоснование адекватности исходной математической модели движения ДТМ реальному объекту; 2) проверка адекватности системы управления движением ДТМ в нормальных условиях функционирования поведению реального объекта; 3) анализ эффективности интеллектуальной системы стабилизации движения ДТМ при заносах; 4) анализ эффективности интеллектуальной системы компенсации опасных возмущений при движении ДТМ.

Адекватность исходной нескорректированной имитационной модели движения ДТМ обосновывается путем верификации её модели и реального объекта. На рисунке 10 представлена иллюстрация проведенных экспериментов над реальным объектом. Кривые $y_{1i}^o(x)$, $y_{2i}^o(x)$, $y_{3i}^o(x)$ – траектории ДТМ при рулевых воздействиях с установившимися значениями угловых положений

рулевого колеса: $\beta_{ycm1}=12,6$ рад, $\beta_{ycm2}=8,4$ рад, $\beta_{ycm3}=4,2$ рад соответственно. На рисунке 11 представлены кривые траектории, рассчитанные по математической модели (1) и для реального объекта (2) при $\beta_{ycm1}=12,6$ рад.

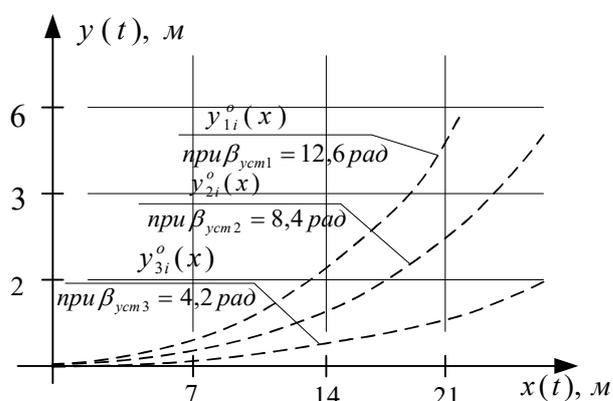


Рисунок 10. Экспериментальные кривые траектории движения ДТМ

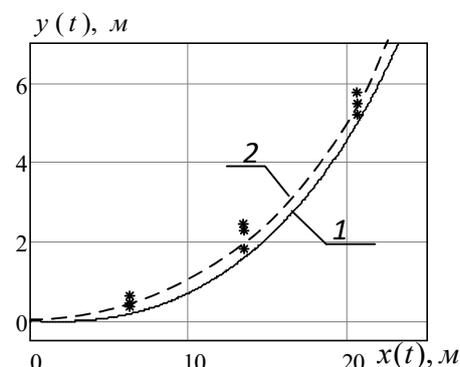


Рисунок 11. Траектория движения реального объекта (2) и ее модели (1) при $\beta_{ycm1}=12,6$ рад

На основе анализа, проведенного по результатам эксперимента, видно, что исходная имитационная модель движения ДТМ является адекватной реальному объекту.

Вторая цель четвертой главы достигается путем проведения серии вычислительных экспериментов. На вход модели подаются несколько профилей кривых входного сигнала в виде углового положения рулевого колеса и выполняется анализ системы управления с обратными связями в нормальных условиях функционирования. Так, на рисунках 12 и 13 в качестве примера представлены траектории модели ДТМ при эксперименте с одним циклом руления и с двумя циклами руления соответственно.

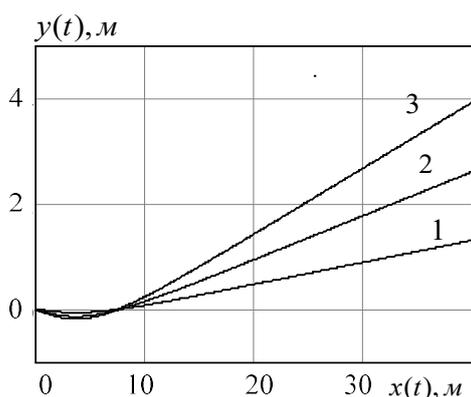


Рисунок 12. Траектория движения ДТМ с одним циклом руления

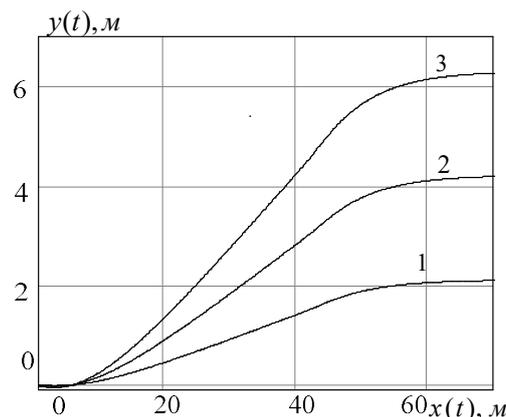


Рисунок 13. Траектория движения ДТМ, с двумя циклами руления

Под циклом руления понимается процесс рулевого воздействия, при котором рулевое колесо вращается в положительном направлении и возвращается в нулевое положение со временем так, что транспортный

механизм меняет курс. При двух циклах руления во втором цикле рулевое колесо вращается в обратном направлении и возвращается в нулевое положение со временем так, что транспортный механизм как бы меняет полосу движения. На рисунках представлены по три кривых траектории при различных максимальных значениях угла рулевого колеса при рулевом воздействии: $\beta_{\max 1}=6$ рад (1), $\beta_{\max 2}=4$ рад (2), $\beta_{\max 3}=2$ рад (3). Как видно из рисунка 12 транспортный механизм меняет курс движения, а на рисунке 13 меняет полосу движения. По результатам всех экспериментов видно, что система управления, созданная для нормальных условий функционирования, является адекватной поведению управляемого реального объекта движения.

Для анализа адекватности процессов заноса, воспроизводимых моделью, заносам реального объекта выполнены эксперименты над реальным объектом. На рисунке 14 представлено семейство экспериментальных кривых заносов при различных скоростях движения ДТМ и при одинаковых управляющих входных сигналах. На рисунке 15 представлены кривые траекторий реального объекта и модели для сравнения. По кривым на рисунке 14 видно, что при увеличении скорости движения радиус поворотов увеличивается, что свидетельствует об увеличении заносов. Сравнение кривых реального объекта и выдаваемых моделью показывает адекватность процессов заносов, воспроизводимых моделью, процессам заносов реального объекта.

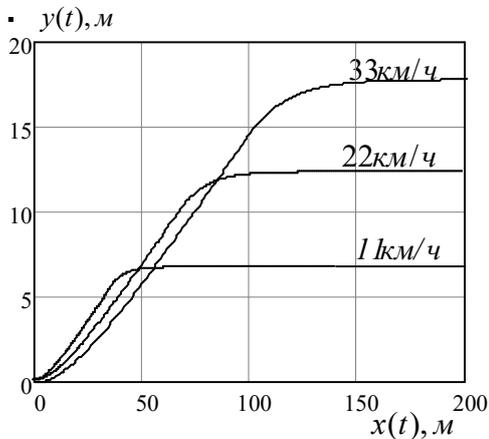


Рисунок 14. Траектория ДТМ при различных скоростях

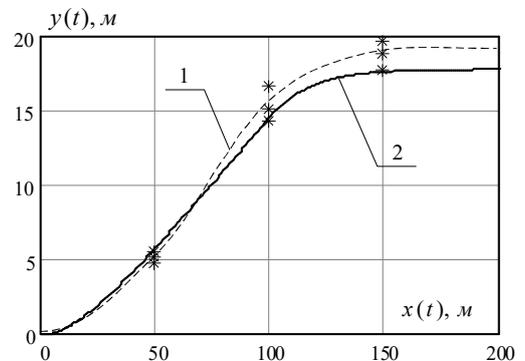


Рисунок 15. Сравнение экспериментальной (1) и расчетной (2) кривых при скорости 33 км/ч

Эффективность системы стабилизации движения ДТМ при заносах обосновывается результатами расчета по модели. На рисунке 16 представлены траектории движения модели ДТМ при включенной системе стабилизации движения при заносах и при различных значениях коэффициента обратной связи $K_{нл}$. Как видно из рисунка, радиус поворотов ДТМ уменьшается с $R_n=100$ м до $R_n=25$ м при коэффициенте $K_{нл}=3$, что говорит об эффективности системы стабилизации.

Для анализа эффективности системы компенсации возмущений при

движении проведены расчеты по модели при включенной и выключенной интеллектуальной логической нечеткой системе компенсации возмущений. На рисунке 17 представлены траектории ДТМ при выключенной (1) и включенной (2) интеллектуальной обратной связи. Сравнительный анализ показывает эффективность системы компенсации опасных возмущений, так как модель ДТМ движется в установившемся режиме и становится устойчивой.

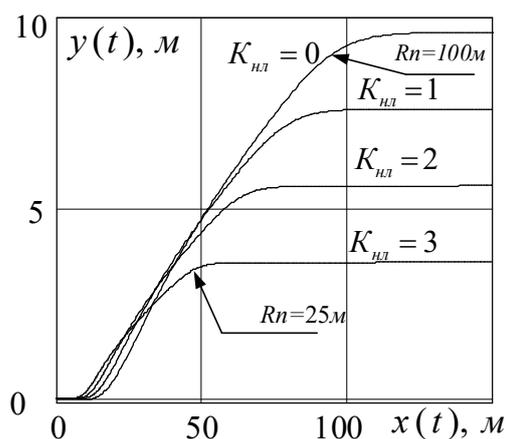


Рисунок 16. Траектория ДТМ при включенной системе стабилизации заносов при различных $K_{нл}$

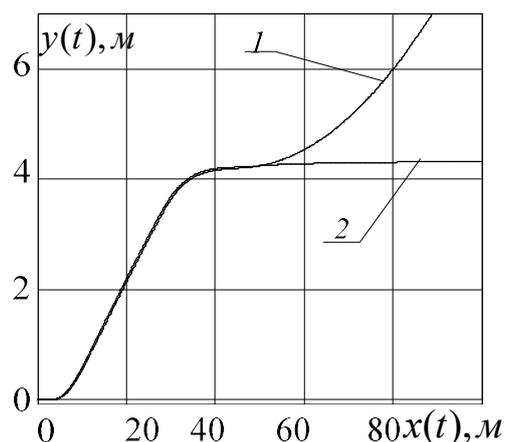


Рисунок 17. Траектория ДТМ при выключенной (1) и включенной (2) системе компенсации

Таким образом, в главе обоснована адекватность исходной имитационной модели движения гусеничного ДТМ реальному объекту; проверена адекватность системы управления его движением поведению управляемого объекта; выполнен анализ эффективности интеллектуальной системы стабилизации движения ДТМ при заносах и анализ эффективности интеллектуальной системы компенсации опасных возмущений при движении.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана методика анализа ДТМ как объекта управления, позволяющая рассматривать его как однозвенный объект, осуществляющий плоскопараллельное движение. Разработана концепция построения системы управления, основанная на ее декомпозиции на три подсистемы: а) подсистему автоматического управления гидравлическим рулевым приводом, б) подсистему управления движением ДТМ в нормальных условиях функционирования, в) подсистему стабилизации движения при заносах ДТМ и компенсации опасных возмущающих факторов, влияющих на движение гусеничного ДТМ в условиях неопределенности. База правил интеллектуальных блоков основана на знаниях экспертов.

2. Разработана структура системы автоматического управления гидравлическим рулевым приводом, основанная на введении местной

электрической обратной связи по угловому положению электромеханического устройства и электрической обратной связи по угловому положению кинематических звеньев ДТМ относительно друг друга. Предложена электромеханическая система управления наклонной шайбой аксиально-поршневого насоса взамен гидромеханической. Обоснована эффективность технических решений. После введения обратных связей и алгоритма управления быстродействие системы управления повысилось почти в 10 раз.

3. Разработана структура системы автоматического управления ДТМ в нормальных условиях функционирования, основанная на введении дополнительной обратной связи на систему управления силовым приводом по скорости поступательного движения ДТМ, а также на введении жесткой обратной связи на систему управления рулевым приводом по угловому положению ДТМ и его скорости. Разработанная система управления удовлетворяет требуемым динамическим свойствам при движении в нормальных условиях (в режиме управления и стабилизации). Однако при действии значительных опасных внешних возмущений в системе возникают большие динамические ошибки.

4. Разработанный нечеткий блок НЛ-2 стабилизирует движение ДТМ при поворотах, возникающих при боковых заносах, за счет логической связи, формируемой на основании угла и скорости поворота руля, воздействующей на силовой привод. Как показали модельные расчеты, при больших скоростях движения ДТМ радиус поворотов может быть уменьшен с 100 м до 25 м, что говорит о возможности системы уменьшать влияние заносов в 4 раза.

Система компенсации опасных возмущений при движении гусеничного ДТМ реализуется нечетким блоком НЛ-1, которым, на основе выделения наибольшего отклонения от заданной траектории по одной из координат и по скорости этого отклонения, формируется сигнал на рулевой привод ДТМ. При включении интеллектуальной системы компенсации опасных возмущающих воздействий ДТМ возвращается на заданную траекторию движения. Данная система компенсации способна оперативно ликвидировать отклонения от траектории при больших скоростях движения ДТМ.

5. Разработано программное обеспечение, в котором реализованы предложенные алгоритмы системы управления ДТМ, функционирующие в нормальных и критических условиях при действии опасных возмущений, при боковых заносах или при возникновении различных критических ситуаций. Выполнены численные и натурные эксперименты, подтверждающие адекватность созданных моделей. Проведена оценка эффективности предложенных алгоритмов управления систем управления на базе разработанных моделей. Разработано программное обеспечение для проведения исследований и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662474 от 11.11.2016г.

ПУБЛИКАЦИИ, ОТРАЖАЮЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

В изданиях рекомендованных ВАК

1. 48. Ильясов Б.Г. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч.А., Синтез интеллектуальной системы управления движением двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь» на основе имитационного моделирования// Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 10 (52) Часть 2, С. 46–53.

2. 47. Ильясов Б. Г. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч. А., Метод получения имитационных моделей движения двухзвенных гусеничных транспортеров «Витязь»// Вестник УГАТУ. 2016Т. 20, №1 (71). С. 20–25.

3. 42. Ильин А. И., Целищев В. А., Пугин А. М., Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч. А., Сайфеев Т. Р, Сравнительный анализ нелинейностей математической модели рулевого механизма двухзвенного транспортера «Витязь» с гидравлической обратной связью// Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 4 (56). С. 167–176.

4. 41. Ильин А. И., Сайфеев Т. Р., Целищев В. А., Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч. А. Математическое моделирование рулевого механизма двухзвенного транспортера «Витязь» с гидравлической обратной связью// Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, №1 (54). С. 73–78.

5. Ильин А.И., Хуснутдинов Д.З., Султанов Р.Г., Яруллин Ч.А., Сайфеев Т.Р. Анализ эффективности автоматического демпфирующего устройства гидропривода рулевого механизма двухзвенного транспортера «Витязь»//Нефтегазовое дело. 2014. № 12-1. С. 149–153.

В других изданиях

1. Хуснутдинов Д.З., Нечеткая логическая система компенсации возмущений при движении двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь»// Управление большими системами: материалы XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Пермь: ИПУ им. Трапездникова, 2017, С. 347–355.

2. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч. А., Система управления поворотами снегоболотохода «Витязь» на основе электрической обратной связи//Научные технологии в машиностроении: материалы научно-практической конференции. Уфа: УГАТУ, 2015. С.117–118.

3. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч. А., Методика расчета демпфирующего устройства для гидропривода рулевого механизма двухзвенного транспортера «Витязь»// Научные технологии в машиностроении: материалы научно-практической конференции. Уфа: УГАТУ, 2014. С. 126–127.

4. Хуснутдинов Д. З., Нестационарная и нелинейная математическая модель рулевого механизма двухзвенного транспортера «Витязь»// Мавлютовские чтения: материалы VII Всероссийской молодежной научной конференции. Уфа: УГАТУ, 2013. С. 133–136.

5. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч. А., Анализ влияния нелинейностей на динамику рулевого механизма двухзвенного транспортера «Витязь» с

гидравлической обратной связью// Научные технологии в машиностроении: материалы научно-практической конференции. Уфа: УГАТУ, 2013. С. 151–152.

6. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч. А., Нелинейная математическая модель рулевого механизма двухзвенного транспортера «Витязь»// Научные технологии в машиностроении: материалы научно-практической конференции. Уфа: УГАТУ, 2012. С. 116–117

7. Сайфеев Т. Р., Хуснутдинов Д. З., Ильин А.И., Яруллин Ч. А., Математическое моделирование рулевого механизма двухзвенного транспортера «Витязь» с гидравлической обратной связью// Динамика машин и рабочих процессов: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. С. 207–210

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.03
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 8 от 04.10.2018 г.)

Заказ № 636. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной полиграфии
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244