

Авторефер.

Д 72

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Аспирант ДРАГАЕВ В. П.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ
СРЕДСТВ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
ВОЖДЕНИЯ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ПРИ ИЗМЕНЕ-
НИИ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ

Специальность 05.198 — автоматизация
производственных процессов

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

Одесса — 1972 г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

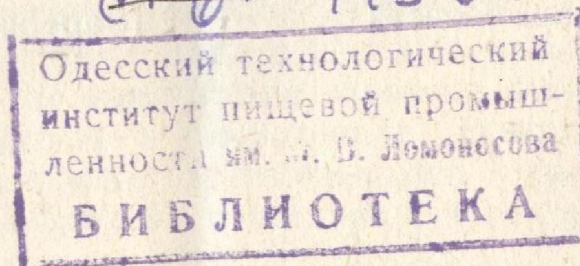
Аспирант ДРАГАЕВ В. П.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОЛЕСНЫХ ТРАН-
СПОРТНЫХ СРЕДСТВ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО ВОЖДЕНИЯ С ПЕРЕМЕН-
НОЙ СТРУКТУРОЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТИ
ДВИЖЕНИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ

Специальность 05.198 — автоматизация
производственных процессов

Автореферат 1987 г.

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



ОНАХТ 27.07.11
Исследование динамик



v011961

Одесса — 1972 г.

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация производственных процессов» Одесского технологического института им. М. В. Ломоносова.

Научные руководители:

Доктор технических наук, профессор
Доктор технических наук, профессор

Платонов П. Н.
Кринецкий И. И.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор

Чинаев П. И.
(Киев).

Кандидат технических наук

Гвинерия К. И.
(Москва).

Ведущее предприятие — Центральный научно-исследовательский автополигон НАМИ
(г. Дмитров, Московской обл.).

Автореферат разослан

«17» января 1972 г.

Защита диссертации состоится

«21» февраля 1972 г.

на заседании Совета Одесского технологического института имени М. В. Ломоносова.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять в Совет института по адресу: г. Одесса-39, ул. Свердлова, 112, Технологический институт имени М. В. Ломоносова.

Ученый секретарь Совета

(Запорожец Л. А.)

ВВЕДЕНИЕ

Намеченные Коммунистической партией и Правительством СССР масштабы развития народного хозяйства требуют комплексного подхода к развитию как основного производства, так и его смежных звеньев — транспорта, связи, материально-технического снабжения. Выполнение главной задачи девятой пятилетки требует внедрения высокоэффективного оборудования и машин во все отрасли народного хозяйства, и прежде всего техническая вооруженность должна коснуться сельского хозяйства, легкой и пищевой промышленности, складского хозяйства, погрузочно-разгрузочных и других тяжелых ручных работ, где занято значительное количество рабочих.

Растущий из года в год поток самоходных машин и агрегатов требует вовлечения в их обслуживание новых трудовых ресурсов. В то время, как сравнительно хорошо разработаны и нашли широкое применение системы автоматического управления непрерывными поточно-транспортными установками, недостаточно разработаны вопросы автоматизации периодического транспорта. Однако опыт ряда предприятий доказал высокую экономическую эффективность комплексной автоматизации управления движением самоходными машинами. Так например, в легкой и пищевой промышленности для транспортирования штучных грузов применяются колесные тягачи ЭТ-250, АТ-60 и др. Автоматизация вождения одного такого тягача, по данным Рижского ЦКБ, дает экономический эффект в 2600 руб. в год.

Системы автоматического вождения колесными транспортными средствами найдут широкое применение, в первую очередь, там, где присутствие человека в машине недопустимо или нежелательно (полигонные испытания новой техники), при многократно повторяющихся траекториях движения (внутризаводской транспорт, погрузочно-разгрузочные работы и др.).

Широкое внедрение колесного транспорта во все отрасли народного хозяйства ставит перед наукой ряд проблем по усовершенствованию и разработке новых машин, обладаю-

щих автоматическими устройствами для управления их движением по заданной траектории.

Целью настоящей диссертации является разработка систем автоматического вождения с переменной структурой колесных транспортных средств при изменении скорости движения в широком диапазоне.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, приложения и списка использованной литературы, включающего 133 наименования. Общий объем: основного текста — 160 машинописных страниц, 77 рисунков и 8 таблиц; приложений — 38 страниц.

1. Состояние вопроса и задачи исследования

Первые попытки автоматизации вождения относятся к началу XX века к сельскохозяйственным машинам. Борозда использовалась в качестве задатчика программы. Большинство работ по автоматизации вождения с 1909 по 1950 годы носит технико-прикладной характер. Создавая различные технические устройства и приспособления, авторы не исследовали свойства самоходной машины как объекта управления.

Начиная с 1955 г., проводятся систематические разработки в области создания систем автоматического вождения (САВ) самоходными машинами и элементов таких систем в НАТИ, НАМИ, УНИИМЭСХ, ВНИИЭСХ, ВНИИСХОМ, МАМИ, в Тбилисском институте механики машин, в Ташкентском институте ирригации и механизации сельского хозяйства, в Новочеркасском политехническом институте на кафедре электрификации и автоматизации горных работ.

Программа движения задается токонесущим кабелем, бороздой, полосой растений, горизонтальной составляющей магнитного поля земли, нанесенной краской линией, лучом лазера, с помощью функциональных преобразователей в самой машине и т. д. Соответственно положение машины относительно заданной траектории определяется механическими, электромагнитными, фотооптическими и другими датчиками.

Большое внимание уделяется проблеме создания САВ за рубежом, особенно в последнее десятилетие (работы Кикути Э., Огуси М. и других в Японии, Баррика Д., Сиджела Л. в США). В Италии, Японии, США, Франции и других странах особое внимание уделяется разработке САВ транспортно-погрузочных средств, предназначенных для работы в производственных помещениях и на территории крупных предприятий, САВ для проведения испытаний новой техники,

САВ для повышения эффективности короткопробежных перевозок и безопасности движения.

В СССР значительный вклад в разработку САВ и элементов таких систем внесли Литинский С. А., Двали Р. Р., Гельфенбейн С. П. и Свирщевский А. В., Тараненко П. И. В последние годы появился ряд работ в области исследования динамики самоходных машин и нелинейных систем автоматического вождения. Это диссертации Драновского А. И., Ракина А. А., Юрчевского А. А., Глебова Н. А., в которых разрабатываются широтно-импульсная САВ, релейная САВ, программная САВ и оптимальная по быстродействию следящая система контроля направления движения.

Практически важной задачей для создания САВ является исследование динамики самоходной машины при изменении скорости движения в широком диапазоне и определение структуры модели транспортного средства как объекта управления. Существующие математические модели самоходных машин относятся, главным образом, к тихоходным объектам (трактор у Литинского С. А., Драновского А. И., комбайн у Шеповалова В. Д.) или к автомобилю в режиме низких скоростей движения (Ракин А. А.), а разработанные САВ обеспечивают движение объекта по заданной траектории при изменении скорости движения в узких пределах. Исследование поведения человека, управляющего движущимся объектом, и анализ системы «человек—автомобиль» в целом, проведенные Кикучи Э. (Япония), показали, что система автоматического вождения должна быть построена по принципу самонастраивающихся систем.

Экспериментальные исследования динамики автомобиля, как объекта автоматического управления, проведенные Ракиным А. А., показали, что при изменении скорости движения динамические параметры объекта изменяются. Однако экспериментальная проверка носила узкий характер (исследовался только один тип машины, скорости изменялись до 40 км/час).

Попытка формального переноса САВ, разработанной для тихоходной машины, на быстроходные транспортные средства, оказалась непродуктивной, такие САВ не способны удерживать объект на заданной траектории при высоких скоростях движения. Кроме того, существующие САВ колесного и гусеничного трактора, автомобиля и напольного тягача не учитывают влияния транспортируемого груза. Поскольку режим периодической загрузки—выгрузки является характерным для колесных транспортных средств, при разработке САВ необходимо учитывать этот фактор.

В настоящей работе были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать динамику колесного транспортного средства как объекта автоматического управления и составить его математическую модель.

2. Провести экспериментальное исследование динамических характеристик колесных транспортных средств тяжелого, среднего и легкого класса в широком диапазоне изменения скорости движения и номинальной загрузке машины.

3. Провести сравнительное исследование существующих систем автоматического вождения в широком диапазоне изменения скорости движения.

4. Синтезировать и исследовать системы автоматического вождения с переменной структурой для управления колесными транспортными средствами в широком диапазоне изменения скорости движения.

5. Разработать и технически реализовать систему автоматического вождения с переменной структурой на промышленных элементах.

2. Колесное транспортное средство как объект автоматического управления и исследование САВ с жесткой структурой

Разрабатывая систему автоматического вождения, необходимо исследовать колесную машину как объект автоматического управления. Анализ динамики движения самоходной машины с учетом определенных допущений позволил определить передаточную функцию колесного транспортного средства как объекта управления. Регулируемым параметром является линейное отклонение объекта от заданной траектории движения x , а регулирующим воздействием — изменение положения управляемых колес φ .

Математическая модель объекта управления получена для двухколесной расчетной схемы и следующих допущений:

1. Колесная машина представляет собой единое твердое тело, связанное с дорогой посредством гибких шин.

2. Движение колесной машины происходит в горизонтальной плоскости и рассматривается как плоскопараллельное.

3. Центр тяжести расположен на оси симметрии машины.

4. Угол поворота управляемых колес мал и одинаков для правого и левого колеса.

5. Углы бокового увода передних и задних колес малы.

6. Движение колесной машины рассматривается при достаточно больших радиусах поворота.

7. Движение колесной машины происходит без проскальзывания шин в боковом направлении.

Принятые допущения позволяют считать, что между боковыми реакциями, действующими на колеса, и углами бокового увода существует пропорциональная зависимость с коэффициентами пропорциональности K_{δ_1} и K_{δ_2} для передних и задних колес соответственно.

Выведенные передаточные функции колесного транспортного средства по управляющему воздействию — углу поворота управляемых колес и управляемой величине — курсовому углу α и линейному отклонению x имеют вид:

$$W_{\varphi-\alpha}(p) = \frac{K_0(T_3 p + 1)}{p(T_2 p^2 + T_1 p + 1)}, \quad (1)$$

$$W_{\varphi-x_0}(p) = \frac{K(T_3 p + 1)}{p^2(T_2 p^2 + T_1 p + 1)}. \quad (2)$$

Получены аналитические соотношения, связывающие динамические параметры объекта управления — постоянные времени T_1 , T_2 , T_3 и коэффициент усиления K_0 и K — с физическими и геометрическими величинами машины.

Рассматривается обобщенная математическая модель колесного транспортного средства и исследуется влияние изменения динамических параметров объекта на структуру модели. Анализ полученной математической модели показал, что движущееся колесное транспортное средство является сложным объектом управления прежде всего потому, что коэффициенты его изменяются в широких пределах от скорости движения, изменения общего веса, вызванного наличием транспортируемого груза, изменения коэффициентов бокового увода колес, которые зависят от целого ряда трудноучитываемых и неконтролируемых факторов. Проведенное аналитическое исследование влияния изменения коэффициентов объекта управления на структуру передаточной функции при изменении скорости движения в широком диапазоне позволило с достаточной для практических целей точностью описать объект управления передаточной функцией вида

$$W_{x_0}(p) = \frac{K(T_3 p + 1)}{p^2(T_1 p + 1)} \quad (3)$$

с переменными коэффициентами, которая отражает главные особенности колесной машины.

Методом электронного моделирования на АВМ было проведено сравнительное исследование существующих нелинейных САВ с жесткой структурой, когда колесное транспортное средство описывалось моделью, полученной аналитически, а его коэффициенты изменялись в функции скорости движения при наличии транспортируемого груза и без него

по расчетным соотношениям. В качестве устройства ориентации моделировалась индукционная система, в качестве нелинейного управляющего устройства — релейный и широтно-импульсный регулятор, исполнительный механизм описывался инерционным астатическим звеном с астатизмом первого порядка.

Целью сравнительного исследования нелинейных САВ с жесткой структурой было выявить диапазон возможностей такого класса систем для обеспечения автоматического вождения по заданной траектории при изменении скорости движения в широком диапазоне. Кроме того, исследовалось влияние нелинейности привода исполнительного механизма типа «люфт» на показатели качества работы САВ и способы устранения этого влияния, были получены оптимальные значения настроечных параметров системы (параметры корректирующего звена, обратных связей по курсовому углу α и углу поворота управляемых колес φ , величина выноса чувствительного элемента от центра тяжести машины) и характер изменения оптимальных настроечных параметров в функции скорости движения.

Результаты проведенного исследования показали, что нелинейные САВ с релейным и широтно-импульсным регулятором обеспечивают наилучшее время регулирования $2 \div 3$ сек. и колебательный характер переходного процесса при фиксированных значениях динамических параметров объекта управления, т. е. нелинейные САВ с жесткой структурой управляющего устройства чувствительны к параметрическим возмущениям и требуют либо стабилизации параметрических возмущений, либо измерения текущих значений параметров объекта управления и введения коррекции настроечных параметров регулятора.

3. Экспериментальное исследование колесного транспортного средства

Проведенные аналитические исследования позволили сделать ряд предположений о структуре модели колесного транспортного средства и характере изменения динамических параметров машины от изменения режимных условий. Действительный характер и диапазон изменения параметров объекта управления так же, как и справедливость допущений, принятых при аналитическом построении модели колесной машины, требуют тщательной экспериментальной проверки.

В результате анализа существующих методик экспериментального исследования динамики такого класса объектов была разработана методика и на ее базе специальный изме-

рительный комплекс аппаратуры, которые позволили устранить ряд существенных недостатков имеющихся методик. При экспериментальном исследовании динамических характеристик колесного транспортного средства предлагается снимать методом активного воздействия кривые разгона по курсовому углу $\alpha(t)$. После обработки на АВМ экспериментальных кривых по $\alpha(t)$, согласно разработанной программы, получаем динамические характеристики по линейному отклонению как центра тяжести машины x_0 , так и любой точки, удаленной на расстояние R от центра тяжести.

Регистрация изменения курсового угла вместо линейного отклонения дает целый ряд преимуществ:

1. Можно воспользоваться точными гироскопическими датчиками, позволяющими регистрировать практически любые отклонения от заданной траектории; фиксировать как изменение курсового угла, так и скорость и ускорение от этого изменения, что повышает точность определения динамических параметров исследуемого объекта.

2. Значительно упрощается проведение экспериментальных заездов, особенно на высоких скоростях; отпадает необходимость в кабеле и специальном генераторе для его питания; снижается разброс экспериментальных данных для одного и того же скоростного режима.

3. Обеспечивается универсальность аппаратуры — можно исследовать динамику как тихоходных, так и быстроходных машин, можно исследовать как динамические, так и технико-эксплуатационные свойства объекта.

Разработанная программа обработки экспериментальной информации на АВМ методом обучаемой эквивалентной модели позволяет определить структуру объекта управления любого порядка и более точные численные значения входящих в нее коэффициентов.

В этой главе дан анализ требований и условий проведения экспериментов, которые были положены в основу разработки специального измерительного комплекса аппаратуры, дана характеристика всех элементов и узлов и описание работы одного измерительного канала.

Измерительный комплекс аппаратуры позволяет измерять и регистрировать следующие параметры объекта управления: 1) курсовой угол; 2) угловую скорость поворота продольной оси машины в горизонтальной плоскости; 3) угол поворота управляемых передних колес; 4) угол поворота рулевого колеса; 5) угол крена; 6) величину перерузки; 7) скорость движения; 8) время.

Коммутация всех датчиков с осциллографом, блоком питания и остальными элементами измерительного комплекса осуществляется блоком распределения. Управление всем

комплексом осуществляется через центральный пульт дистанционного управления.

Так как нулевые значения регистрируемых параметров, установленные на неподвижном объекте, смещаются в процессе движения на различные величины, в зависимости от скорости движения, в измерительном комплексе разработан блок автоматической установки нулевых значений регистрируемых параметров в процессе движения (режим «Согласование»). Включение режима «Измерение» возможно только тогда, когда произошла автоматическая компенсация входных сигналов в режиме «Согласование», одновременно включается двигатель протяжки светочувствительной бумаги и происходит запись регистрируемого параметра.

Разработанный измерительный комплекс аппаратуры прошел натурные испытания при исследовании динамических характеристик колесных транспортных средств различных классов (тяжелого, среднего, легкого) и изменении скорости движения в диапазоне 10—70 км/час для тяжелых и средних машин и 10—130 км/час для машин легкого класса при номинальной загрузке испытуемых машин и отсутствии груза.

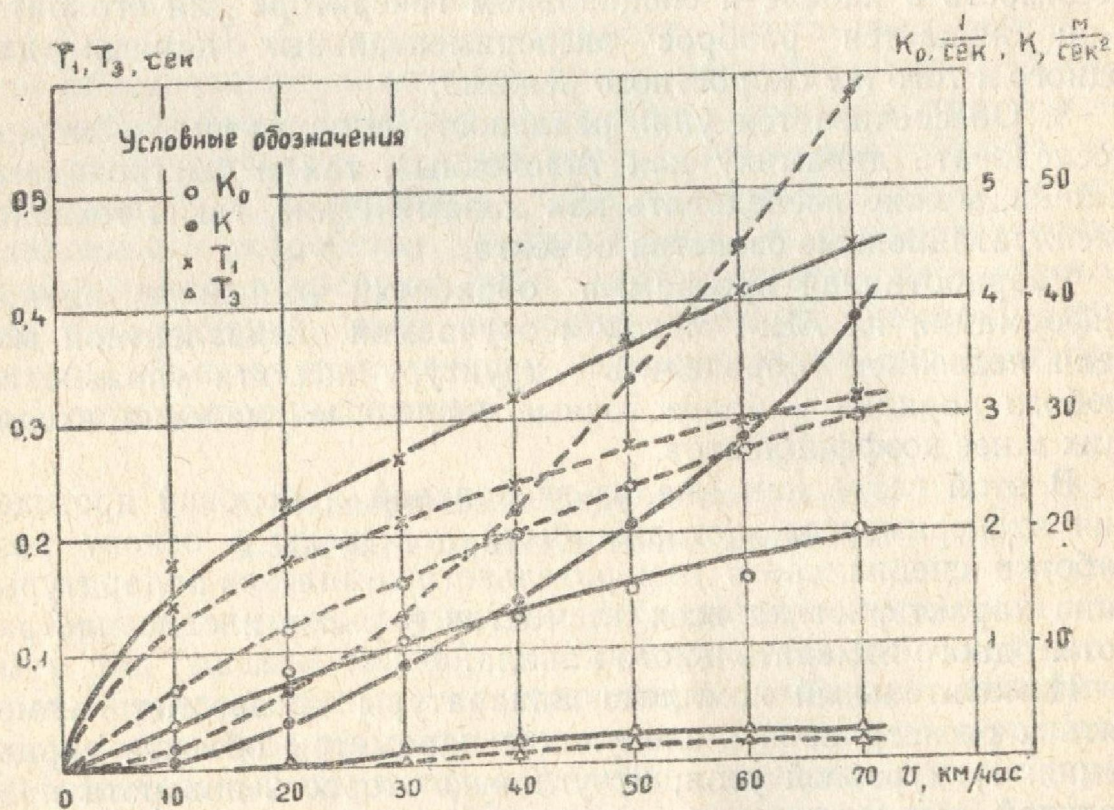


Рис. 1. Зависимость динамических параметров МАЗ-500 от изменения скорости движения (сплошные линии — с грузом 7,5 т; пунктирные — без груза).

На рис. 1 приведены графические зависимости изменения динамических параметров объекта управления, полученные из экспериментальных данных от скорости движения для машин тяжелого класса, и показано влияние наличия транс-

портируемого груза на величину этих параметров (сплошные линии — объект с грузом, 7,5 т; пунктирные — без груза). Для машин тяжелого класса постоянная времени T_3 на порядок меньше постоянной времени T_1 для всего диапазона изменения скорости движения. Для машин среднего и легкого класса она становится соизмеримой при скоростях движения выше 40 км/час. В работе приведены результаты обработки экспериментальных данных на АВМ для всех исследованных машин. Сравнение полученных результатов с аналогичными расчетными показало, что полученные теоретические соотношения правильно отражают тенденцию изменения параметров объекта от скорости движения транспортного средства и дают возможность оценить диапазон изменения коэффициентов конкретного транспортного средства от режимных условий.

Проведенное экспериментальное исследование динамических свойств колесных транспортных средств при изменении скорости движения в широком диапазоне подтвердило справедливость теоретических выводов и дает основание считать, что: 1) колесное транспортное средство является объектом с переменными параметрами; 2) номинальная нагрузка транспортного средства оказывает меньшее влияние на изменение динамических параметров объекта, чем скорость движения; 3) диапазон изменения параметров объекта настолько широк, что приводит не только к количественным изменениям коэффициентов модели, но и к качественным — к изменению структуры; 4) передаточная функция вида $K(T_3 p + 1) / p^2 (T_1 p + 1)$, полученная в результате экспериментального исследования, совпадает с видом передаточной функции, полученной аналитически при принятых допущениях.

Проведенная оценка погрешности величин, получаемых в результате обработки данных эксперимента, показала, что суммарная погрешность не превышает 14% и обусловлена она, главным образом, разрешающей способностью АВМ (12%). Широкое распространение АВМ для исследования самых различных задач свидетельствует о том, что такая точность является вполне допустимой при практическом применении результатов экспериментального исследования.

4. Исследование систем автоматического вождения с переменной структурой

Показателями качества работы систем автоматического вождения при изменении скорости движения в широком диапазоне являются быстродействие и точность слежения заданного направления движения. Результаты проведенного на АВМ сравнительного исследования нелинейных систем САВ

с жесткой структурой и данные об испытаниях таких систем, проведенные Ракиным А. А., Драновским А. И. и другими, показывают, что, чем выше скорость движения, тем труднее удержать объект на заданной траектории, так как в системе возникают автоколебания. Поэтому необходимо вводить непрерывную коррекцию настроечных параметров регулятора в функции скорости движения. Отсутствие коррекции параметров системы при изменении скорости движения приводит к тому, что система не способна удерживать машину на заданной траектории при скоростях, выше 3,2 км/час (система управления тягачем).

На основании накопленного предыдущими исследователями опыта и проведенного исследования САВ с релейным и широтно-импульсным регулятором разрабатывается и исследуется принципиально новая система автоматического вождения с переменной структурой, в основу которой положена теория систем с переменной структурой, разработанная академиком С. В. Емельяновым. Как показали работы Емельянова С. В., Барбашина Е. А., Уткина В. И., Костылевой Н. Е. и других, скачкообразное изменение параметров и структуры систем является наиболее эффективным средством повышения их качественных показателей.

При составлении уравнений динамики САВ с переменной структурой объект управления — колесная машина — рассматривается совместно с чувствительно-преобразующим элементом (датчиком положения), люфт привода рулевого управления отсутствовал, время срабатывания нелинейных логических элементов не оказывает заметного влияния на показатели качества работы системы. Исполнительный механизм описывается звеном первого порядка, управление исполнительным механизмом осуществляется через релейный элемент. Реле и исполнительный механизм охвачены жесткой глубокой отрицательной обратной связью.

Уравнение движения системы при отсутствии внешних возмущений имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} a'_3 \ddot{x} + a'_2 \dot{x} &= b'_2 \dot{\varphi} + b'_1 \varphi, \\ \varphi &= b''_1 u, \\ \varepsilon &= x_{зд} - x, \\ u &= f(\Psi_1 \varepsilon, \Psi_2 \dot{\varepsilon}, \dots, \Psi_{k+1} \varepsilon^{(k)}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где a'_3, a'_2, b'_1, b'_2 — переменные параметры объекта управления; $a'_3 = T_1, a'_2 = 1, b'_2 = KT_3^*, b'_1 = K, T_3^* = T_3 + T_{чз}$; b''_1 — параметр исполнительного механизма: $b''_1 = K_{экв}$; ε — ошибка слежения; u — управляющее воздействие, которое формируется в виде линейной комбинации ошибки и конечного

числа ее производных со скачкообразно меняющимися коэффициентами Ψ_i . За счет изменения коэффициентов Ψ_i можно менять характер связи между каналами передачи информации.

Изменение структуры осуществляется нелинейными логическими элементами. Моменты разрыва управления (моменты смены структуры) совпадают с моментом перехода через ноль функции S , определяющей гиперплоскость переключения.

Примем $X_{зд}$ — положение кабеля, задающего направление движения, за начало отсчета, $X_{зд} = 0$. Уравнение неизменяемой части САВ примет вид

$$\ddot{\varepsilon} + a_2 \dot{\varepsilon} = -(b_2 D + b_1) u, \quad (5)$$

где D — оператор дифференцирования, $a_2 = \frac{1}{T_1}$,

$$b_2 = \frac{KK_{\text{ЭКВ}} T_3^*}{T_1}, \quad b_1 = \frac{KK_{\text{ЭКВ}}}{T_1}$$

$$\left. \begin{aligned} a_{2\max} &\geq a_2 \geq a_{2\min}, \\ b_{2\max} &\geq b_2 \geq b_{2\min}, \\ b_{1\max} &\geq b_1 \geq b_{1\min}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для решения задачи синтеза САВ с переменной структурой используем метод фазового пространства. Чтобы обеспечить непрерывность фазовых траекторий при изменении структуры, разрывное управляющее воздействие u сглаживается с помощью корректирующего устройства. В этом случае состояние системы описывается как основными координатами ε , $\dot{\varepsilon}$, $\ddot{\varepsilon}$, так и промежуточной координатой u^* , и функция управления задается в виде линейной комбинации этих координат.

$$v = \Psi_1 \varepsilon + \Psi_2 \dot{\varepsilon} + \Psi_{u^*} u^*. \quad (7)$$

Процесс управления организуется таким образом, чтобы выбранная комбинация линейных структур и последовательность их изменения обеспечивали в системе скользящий режим, характерной особенностью которого является нечувствительность к внешним и параметрическим возмущениям.

Проведенное исследование фазового пространства при двух алгоритмах управления: $u = \Psi_1 \varepsilon$, $u = \Psi_1 \varepsilon + \Psi_2 \dot{\varepsilon}$ методом «замороженных» коэффициентов выявило при управлении $u = \beta \varepsilon$, $u = \beta_1 \varepsilon + \beta_2 \dot{\varepsilon}$, $u = \beta_1 \varepsilon + \alpha_2 \ddot{\varepsilon}$ среди семейства гиперболических поверхностей с неустойчивыми траекториями поверхность S^* с вырожденным устойчивым движением (рис. 2). Положение в фазовом пространстве поверхности S^*

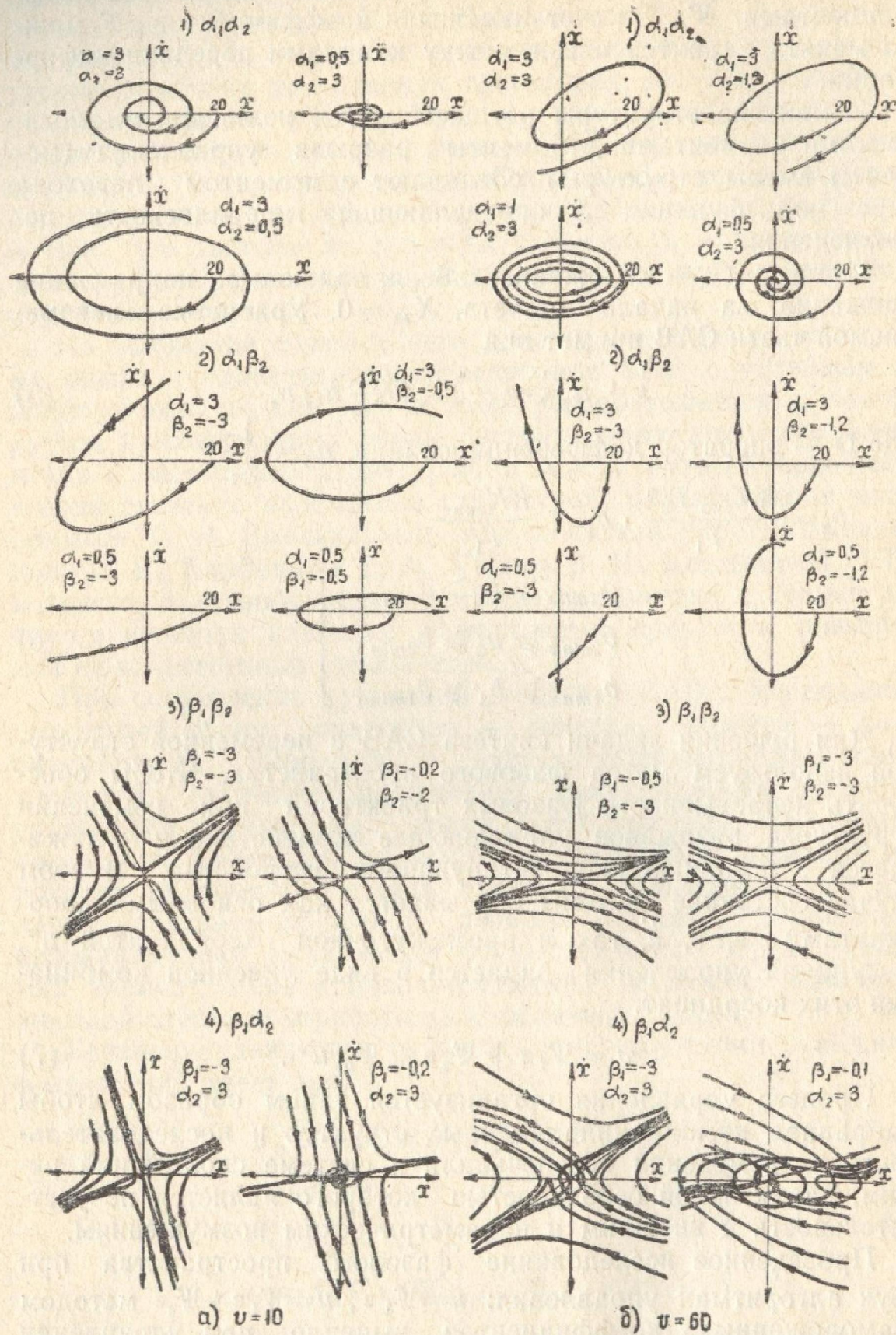


Рис. 2. Фазовые портреты САВ с законом переключения

$$u = \Psi_1 \epsilon + \Psi_2 \epsilon$$

- а) скорость движения 10 км/час;
 б) скорость движения 60 км/час.

с устойчивым вырожденным движением меняется с изменением параметров колесного транспортного средства. Плоскость переключения управления S формируется таким образом, чтобы скользящий режим существовал для всего диапазона изменения параметров объекта управления (6).

САВ с переменной структурой в режиме свободного движения описывается следующей системой дифференциальных уравнений, записанных в фазовых координатах ($\varepsilon = \varepsilon_1$):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= \varepsilon_2, \\ \dot{\varepsilon}_2 &= \varepsilon_3, \\ \dot{\varepsilon}_3 &= -a_2 \varepsilon_3 + \left(\frac{b_2}{T} - b_1 \right) u^* - \frac{b_2}{T} v, \\ \dot{u}^* &= \frac{1}{T} (v - u^*), \\ v &= \Psi_1 \varepsilon_1 + \Psi_2 \varepsilon_2 + \Psi_{u^*} u^*, \\ \Psi_1 &= \begin{cases} \alpha_1 & \text{при } \varepsilon_1 s > 0 \\ \beta_1 & \text{при } \varepsilon_1 s < 0, \end{cases} \\ \Psi_2 &= \begin{cases} \alpha_2 & \text{при } \varepsilon_2 s > 0 \\ \beta_2 & \text{при } \varepsilon_2 s < 0, \end{cases} \\ \Psi_{u^*} &= \begin{cases} \alpha_{u^*} & \text{при } u^* s > 0 \\ \beta_{u^*} & \text{при } u^* s < 0, \end{cases} \\ s &= C_1 \varepsilon_1 + C_2 \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Условие существования скользящего режима

$$s \cdot \frac{ds}{dt} \leq 0 \quad (9)$$

выполняется, если коммутируемые коэффициенты α_1 и β_1 , α_2 и β_2 , α_{u^*} и β_{u^*} удовлетворяют следующим неравенствам:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &> \max_{a_2, b_2} \frac{T}{b_2} (a_2 C_1 - C_1 C_2), \\ \beta_1 &< \min_{a_2, b_2} \frac{T}{b_2} (a_2 C_1 - C_1 C_2), \\ \alpha_2 &> \max_{a_2, b_2} \frac{T}{b_2} (a_2 C_2 + C_1 - C_2^2), \\ \beta_2 &< \min_{a_2, b_2} \frac{T}{b_2} (a_2 C_2 + C_1 - C_2^2), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{u*} &\geq \max_{b_1, b_2} \left(1 - T \frac{b_1}{b_2} \right), \\ \beta_{u*} &\leq \min_{b_1, b_2} \left(1 - T \frac{b_1}{b_2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Параметры плоскости скольжения S и значения коммутируемых коэффициентов выбирались из полученных соотношений в виде неравенств (10) по условию существования скольжения и уточнялись при моделировании на АВМ по минимуму времени переходного процесса.

Полученные переходные процессы САВ с переменной структурой показали, что метод синтеза искусственных устойчивых движений (скользящих движений) обеспечивает устойчивость системы в целом и аperiodический характер протекания переходного процесса для всего диапазона изменения параметров колесного транспортного средства (6), однако быстродействие системы сохраняется высоким, $0,7 \div 1$ сек, при изменении скорости движения в диапазоне $70 \div 40$ км/час. В режиме средних и низких скоростей параметры плоскости скольжения в смысле быстродействия не оптимальны. Однако за счет более крутого наклона плоскости S^* с вырожденным устойчивым движением для этих скоростных режимов можно изменить положение плоскости скольжения S таким образом, чтобы быстродействие сохранялось в тех же пределах для всего диапазона изменения скоростей движения.

Исследовано влияние параметров плоскости скольжения на быстродействие системы в целом и определены оптимальные значения плоскости скольжения для трех положений S в фазовом пространстве. В результате синтеза САВ с переменной структурой и исследования режима свободного движения выявлены два пути обеспечения высокого быстродействия при изменении параметров объекта в заданном диапазоне: 1) ступенчатая коррекция положения плоскости скольжения, 2) уменьшение периода с установившейся скоростью скольжения за счет изменения соотношения коммутируемых коэффициентов.

Проведен синтез закона управления САВ с переменной структурой при наличии внешних возмущений и получены соотношения для выбора коммутируемых коэффициентов, обеспечивающих скользящий режим во всем диапазоне изменения скорости движения объекта. Исследование проводилось при ступенчатом внешнем возмущении по углу поворота управляемых колес. Введение внутренней обратной связи, охватывающей исполнительный механизм, со скачкообразно меняющимся коэффициентом Ψ_φ существенно

повышает быстродействие системы при обработке внешнего возмущения и изменении параметров объекта в достаточно широких пределах.

Исследована САВ с переменной структурой при неполной информации о состоянии объекта в двух вариантах:

1. Система автовождения описывается уравнениями (4):
а) в законе управления отсутствует информация о координате ε_2 , функция переключения содержит полную информацию; б) в законе управления отсутствует информация о координате ε_2 , в функции переключения отсутствует информация о координате ε_3 .

2. Система автовождения описывается уравнением 4-го порядка (передаточная функция исполнительного механизма — $1/Tr$):

а) в функции переключения отсутствует информация о координате ε_3 , в законе управления отсутствует информация о координате ε_4 ;
б) в функции переключения отсутствует информация о координате ε_4 , управление содержит только сигнал по ошибке.

Уменьшение объема информации увеличивает чувствительность САВ к изменению параметров объекта. САВ с переменной структурой и изменяющимися параметрами более чувствительна к потере информации, необходимой для формирования функции переключения, чем к потере информации, необходимой для формирования закона управления. Для исследованных САВ с переменной структурой и заданном диапазоне изменения параметров существует критический объем необходимой информации, в зависимости от порядка системы, ниже которого система теряет работоспособность.

Результаты данной главы позволяют сделать обоснованный выбор схемы САВ с переменной структурой для любого класса колесных самоходных машин и конкретного скоростного режима.

5. Разработка систем автоматического вождения с переменной структурой и техническая реализация

Неполная инвариантность САВ с переменной структурой к параметрическим возмущениям обусловлена следующими факторами:

- шириной диапазона изменения параметров транспортного средства;
- неидеальностью скользящего режима;
- ограничениями на величину управляющего воздействия (допустимый поворот управляемых колес).

в. В. ОМ 1961

Разработано и исследовано управляющее устройство с переменной структурой и коррекцией плоскости скольжения от сигнала скорости движения транспортного средства. Введение трехпозиционной коррекции положения плоскости скольжения позволило значительно упростить конструкцию управляющего устройства за счет формирования простейшего алгоритма управления только по сигналу ошибки, сохранив удовлетворительное качество работы системы во всем диапазоне изменения параметров объекта.

Рассмотрены вопросы технической реализации всех функциональных элементов и узлов разработанной САВ с переменной структурой и дано описание работы такой системы автовождения.

В этой главе анализируются принципы построения адаптивных САВ с переменной структурой. Для скачкообразно или медленно меняющихся параметров объекта, вызванных изменением внешней среды (скорости движения, величиной транспортируемого груза, изменением давления в шинах и т. д.) разработана и исследована на аналоговых машинах САВ с переменной структурой и адаптивным контуром. Показано, что для самонастройки адаптивного контура САВ достаточно фиксировать каждое четное переключение структуры — факт вторичного попадания изображающей точки на ту же плоскость скольжения. Даны рекомендации для настройки параметров адаптивного контура при известном диапазоне изменения свойств объекта и характере задающего воздействия.

Анализ работы всех функциональных блоков САВ с переменной структурой был положен в основу конструирования таких систем на принципиально новых решениях — использовании миниатюрных блочных конструкций.

Управляющее устройство с переменной структурой реализовано на малогабаритных полупроводниковых усилителях постоянного тока, серийно выпускаемых промышленностью, предназначенных для работы в условиях значительной вибрации и температурных перепадов, и бесконтактных полупроводниковых логических устройствах — Ψ — ячейках.

В качестве исполнительного механизма в САВ используется рулевая машинка, в которой исключены инерционные свойства исполнительного двигателя в момент разгона и торможения за счет непрерывного режима работы двигателя. Передача вращения выходному валу исполнительного механизма производится от срабатывания соответствующих соленоидов, которые через безлюфтовый редуктор подключают выходной вал.

Разработана и исследована специальная схема форсирования времени срабатывания и отпускания управляемых со-

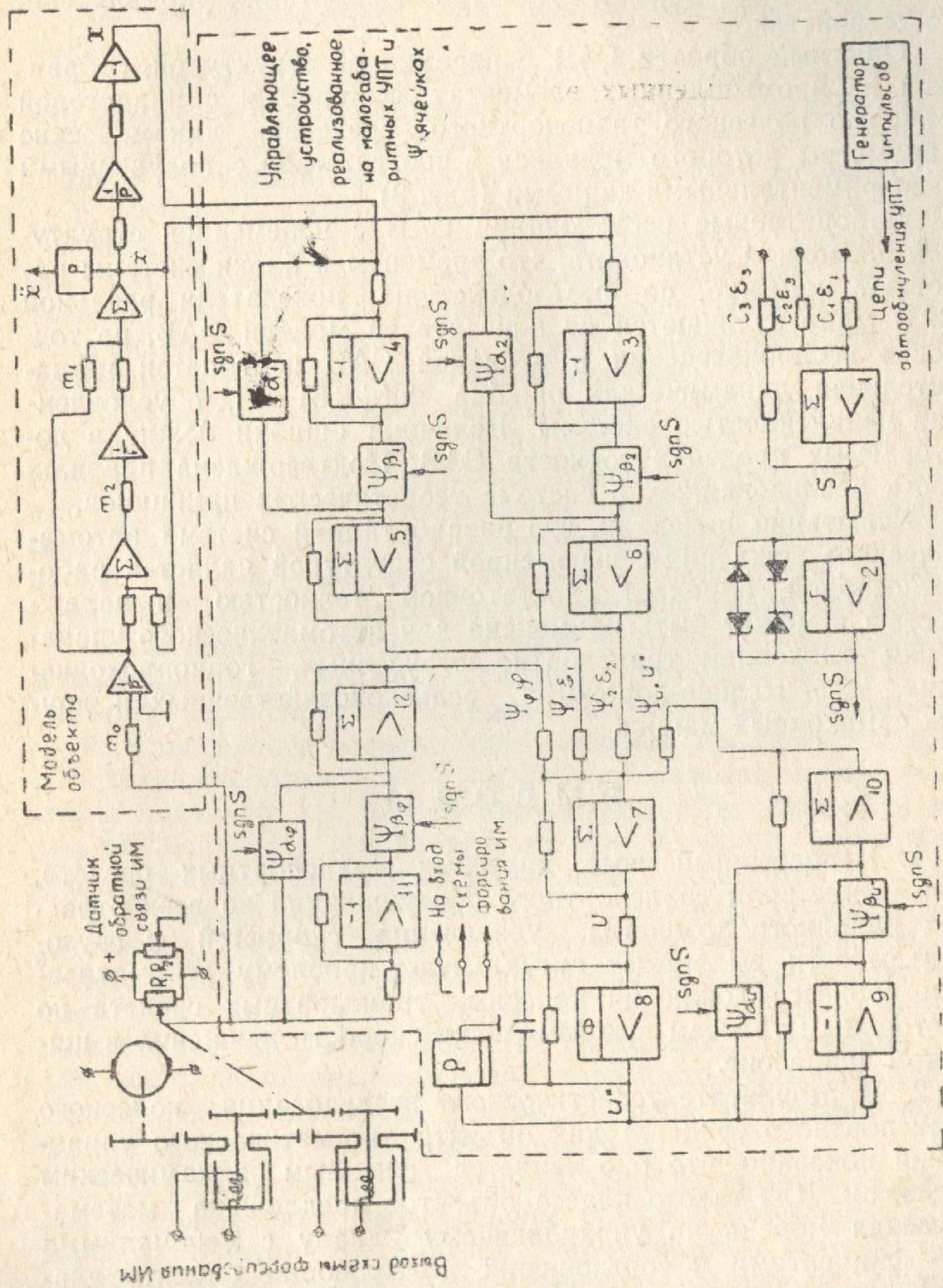


Рис. 3. Система автоматического вождения с переменной структурой.

леноидов, позволяющая практически исключить инерционные свойства исполнительного механизма. Схема форсирования позволила уменьшить длительность включения соленоида со 100 до 8 мксек., время отпускания — со 120 до 14 мксек., что существенно улучшило динамические свойства системы автовождения в целом.

Разработана схема генератора для питания управляющего устройства.

Опытный образец САВ с переменной структурой, собранный на промышленных элементах, сочленялся с аналоговой моделью колесного транспортного средства, динамические параметры которого менялись в соответствии с полученными экспериментальными данными (рис. 3).

Лабораторные исследования САВ с переменной структурой позволили установить, что элементы и блоки системы работают надежно, по быстрдействию показатели реальной САВ мало отличаются от показателей модели САВ, по точности воспроизведения в реальной САВ появляется незначительная динамическая ошибка $\pm(÷2,5)$ см, обусловленная нелинейностью системы. Величина ошибки лежит в допустимых пределах точности САВ. Подтверждена правильность реализованных в системе теоретических принципов.

Испытания показали, что разработанная система автоматического вождения с переменной структурой является работоспособной, обладает достаточной точностью и надежностью и может быть применена для автоматического управления движением транспортно-погрузочных, горнопроходческих, строительно-дорожных, сельскохозяйственных и других самоходных машин.

ВЫВОДЫ

1. Непрерывный рост колесных транспортных средств, повышение роли транспортного обслуживания во всех отраслях народного хозяйства, увеличение скоростей и грузоподъемности выдвигают актуальную проблему автоматизации процесса вождения колесных транспортных средств по постоянным трассам при изменении скорости движения в широком диапазоне.

2. В результате теоретического исследования колесного транспортного средства как объекта автоматического управления показано, что оно является сложным динамическим объектом. Для такого класса объектов предложена математическая модель по управляющему каналу с переменными коэффициентами и соотношения, позволяющие оценить диапазон изменения параметров объекта как от скорости движения, так и от величины транспортируемого груза.

3. Исследование динамики нелинейных САВ с жесткой структурой управляющего устройства — релейным и широтно-импульсным — на АВМ установило, что нелинейные САВ с жесткой структурой обеспечивают удовлетворительное качество вождения при скоростях движения объекта до 40 км/час. Это достигается за счет непрерывной коррекции настроечных параметров при постоянстве всех внешних факторов.

4. Предложена методика экспериментального исследования динамических характеристик колесного транспортного средства, основанная на измерении курсового угла, с последующей обработкой экспериментальных кривых на АВМ.

5. Разработан, изготовлен и проверен при натурных испытаниях специальный измерительный комплекс аппаратуры для экспериментального исследования динамики колесных транспортных средств различных классов (тяжелого, среднего, легкого) при изменении скорости движения в широком диапазоне и номинальной загрузке машины.

6. Экспериментальное исследование динамики объекта управления, охватывающее широкий класс транспортных средств и весь рабочий диапазон изменения режимных условий, подтвердило справедливость передаточной функции вида $K(T_3p+1)/p^2(T_1p+1)$, полученной аналитически, и позволило уточнить диапазон изменения параметров объекта в функции скорости движения и величины транспортируемого груза. Полученная передаточная функция с переменными коэффициентами отражает основные динамические свойства колесного транспортного средства как объекта управления.

7. Проведенное исследование фазового пространства САВ с переменной структурой с различными алгоритмами управления показало, что для систем автовождения применим метод синтеза СПС, основанный на использовании искусственных устойчивых движений (скользящих движений).

8. Отправными условиями для расчета параметров управляющего устройства являются условия существования скользящего режима. Полученные соотношения в виде неравенств позволяют определить значения коммутируемых коэффициентов при выбранном качестве скользящего движения как для всего диапазона изменения параметров объекта, так и для отдельных режимов, соответствующих изменению параметров объекта в более узком диапазоне.

9. В результате исследования САВ с переменной структурой в свободном и вынужденном режимах получены оптимальные значения параметров управляющего устройства и коэффициентов функции переключения; выявлены закономерности изменения качества управления от объема информации, необходимой для формирования закона управления

и функции переключения; разработаны схемы САВ со ступенчатой и плавной коррекцией положения плоскости скольжения, обеспечивающие качественное управление при изменении скорости движения в широком диапазоне.

10. Испытание опытного образца управляющего устройства с переменной структурой, собранного на промышленных малогабаритных операционных усилителях и бесконтактных полупроводниковых переключающих устройствах Ψ — ячейках, совместно с реальным исполнительным механизмом и электронной моделью колесного транспортного средства подтвердило правильность выбранного направления в решении поставленной задачи. Предлагаемые системы автоматического вождения с переменной структурой обеспечивают высокое качество управления как при отработке возмущения по заданию, так и при отработке внешнего возмущения по углу поворота управляемых колес: время отработки возмущения (0,6 ÷ 1) сек, точность слежения заданного направления движения $\pm(1 \div 2,5)$ см, апериодический характер переходного процесса.

11. Предлагаемые САВ с переменной структурой позволяют охватить весь диапазон изменения скорости движения объекта и нечувствительны к изменению параметров транспортного средства, обусловленного величиной транспортируемого груза.

12. Полученные в работе результаты могут быть положены в основу разработки промышленной системы автоматического вождения транспортных средств по заданной траектории движения.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Кринецкий И. И., Драгаев В. П., Драновский А. И. Математическая модель колесной машины как объекта автоматического управления. Сб. материалов семинара по кибернетике «Исследование динамики объектов САУ», вып. 19, АН МССР, Кишинев, 1970.

2. Миронов И. С., Долгозвяг В. А., Бундюк А. Н., Драгаев В. П. Самонастраивающаяся оптимальная по быстродействию система управления. Сб. «Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении», № 8, Львов, 1970.

3. Драгаев В. П., Майборода О. В. Устройство для регистрации траектории движения испытательного автомобиля. Авт. свид. № 311253, приоритет от 25.04.70, «Открытия, изобретения, образцы и товарные знаки», № 24, 1971.

4. Драгаев В. П., Платонов П. Н., Долгозвяг В. А. Устройство для автоматического направления движения транспортного средства. Авт. свид. по заявке № 1624098/27-11, приоритет от 17.03.71.

5. Драгаев В. П. Исследование и разработка адаптивных систем автоматического вождения мобильных объектов. Реферат. информ. о законченных НИР в ВУЗах УССР. «Радиоэлектроника, автоматика и связь», вып. IV, изд-во «Вища школа», Киев, 1971.

6. Драгаев В. П., Майборода О. В. Методика и аппаратура для экспериментального определения динамических характеристик колесной машины. Реферат. информ. о законченных НИР в ВУЗах УССР. «Радиоэлектроника, автоматика и связь», вып. IV, изд-во «Вища школа», Киев, 1971.

7. Кринецкий И. И., Драновский А. И., Драгаев В. П. Исследование динамики колесной машины и выбор оптимального закона управления на электронной модели. Пятая глава монографии «Автоматическое вождение колесных и гусеничных машин по постоянным трассам». Кринецкого И. И., Драновского А. И., изд-во «Машиностроение», М., 1971.

8. Драгаев В. П., Кринецкий И. И., Драновский А. И. Исследование системы автоматического вождения колесной машины по заданной траектории. Тр. научной конференции «Механическая тяга в горном земледелии», Батуми, 1968 г., изд-во «Мецниереба», Тбилиси, 1971.

Основное содержание работы сообщалось в докладах:

1. На Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции по технической кибернетике (НИИТК), Москва, январь, 1969 г.

2. На Всесоюзной конференции по проблеме «Механическая тяга в горном земледелии», Батуми, ноябрь, 1968 г.

3. На VI Всесоюзном научно-техническом семинаре по устойчивости и управляемости автомобилей, Москва, НАМИ, октябрь, 1970 г.

4. На семинаре по технической кибернетике Молдавской территориальной группы Национального Комитета СССР по автоматическому управлению, Кишинев, апрель, 1969 г.

5. На заседаниях Одесского городского семинара по технической кибернетике и автоматическому управлению, октябрь, 1968 г., январь, 1971 г.

6. На XXX и XXXI научных конференциях ОТИ имени М. В. Ломоносова, посвященных 100-летию со дня рождения В. И. Ленина (3 доклада), Одесса, февраль, 1969 г., апрель, 1970 г.

7. На заседаниях кафедр «Автоматизация производственных процессов» и «Подъемно-транспортные машины», ОТИ им. М. В. Ломоносова, июнь, 1970 г. декабрь, 1971 г. и «Автоматика и телемеханика» Одесского политехнического института, январь, 1970 г.