

Автор едр.
Д 72

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
У С С Р

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

Аспирантка ДРАГАЕВА Любовь Петровна

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ДВИЖЕНИЕМ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНО-ПОГРУЗОЧНЫХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ
СКЛАДОВ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

05.13.07 - автоматическое управление
технологическими процессами

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

О д е с с а - 1 9 7 7

OK



v012964

Работа выполнена в Одесском технологическом институте пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ:

доктор технических наук,
профессор
кандидат технических наук,
доцент

ПЛАТОНОВ П.Н.

ПАВЛОВ А.И.

ОПОНЕНТЫ:

аук,

КУЗЬМИН И.В.

аук,

КУЛАКОВСКИЙ А.И.

есомный научно-исследовательский,
технологический институт безрельсово-
шорта (ВНИИЭлектротранспорт).

1977 г.

даний советов на заседании
ОИ (специальность "Автоматизация процессов") Одесского
промышленности имени М.В.Ломоносова (ИИ2).

блиотеке Одесского
ленности имени

1977 г.

МИРОНОВ

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В задачах, выдвинутых ХХУ съездом КПСС, проблема повышения эффективности трудоемких транспортно-погрузочных работ и высвобождения трудовых ресурсов из сферы неосновного производства входит в число важнейших целевых задач десятой пятилетки.

Характерной особенностью большинства отраслей пищевой промышленности является наличие тарно-штучных грузов и большой объем межцеховых и внутрицеховых перемещений – более 40% общего объема транспортных работ по всей пищевой промышленности. Это в первую очередь относится к консервной, кондитерской, хлебопекарной, сахарной отраслям пищевой промышленности. Численность рабочих, занятых на транспортно-погрузочных работах в этих отраслях составляет 35-50% численности основных производственных рабочих, а отношение затрат на эти вспомогательные работы к общим затратам на производство (без стоимости сырья) составляет от 22 до 44%, причем из них более 70% падает на долю заработной платы.

Организация транспортно-погрузочных работ на межцеховых перемещениях грузов в громадной степени зависит от наличия и размещения складов. Почти все отрасли пищевой промышленности испытывают острый недостаток складской площади, обеспечение составляет 60-70%. Однако даже в условиях острого дефицита складской площади коэффициент использования полезной площади складов со стеллажным и штабельным хранением, которые наиболее перспективны для консервных заводов, предприятий розлива, кондитерских изделий, масло-жировых продуктов, фасованного сахара и т.д., крайне низок – 0,3+0,2. Стоимость 1 м² склада особенно велика в складах сырья и готовой продукции со специфичными условиями хранения: охлаждением, отоплением, кондиционированием.

Использование прогрессивного принципа раздельного выполнения транспортных и погрузочно-разгрузочных операций разным оборудованием и автоматизация каждой операции обеспечат существенное сокращение трудовых ресурсов и снижение потерь полезной площади.

Цель и задачи исследования. Целью работы является повышение эффективности безрельсового транспортно-погрузочного оборудования, работающего в условиях складов и производственных помещений, путем автоматического управления движением с заданной точностью на всех режимах транспортирования. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- исследовать динамические свойства колесных транспортно-погрузочных средств с учетом изменения количества прицепов, массы транспортируемого груза и скорости перемещения;

с. В.012964

Одесский технологический институт пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова
БИБЛИОТЕКА

Передает 1982

второй, 11/72
Иссл. и разр. системы 1944
11/2964
ДРАГАЕВА А.П.
6/4

11

разработать методику численной оценки динамических свойств и по-лучить математическую модель объекта управления, удовлетворяющую наи-более распространенным в отраслях пищевой и легкой промышленности тран-спортно-погрузочным средствам;

- обосновать и исследовать систему автоматического управления движе-нием по маршруту произвольной конфигурации, используя внутренние изме-ряемые переменные состояния неизменяемой части системы, и разработать методику выбора оптимальных коэффициентов функции переключения;

- выполнить техническую реализацию разработанной системы, проверку качества работы в натурных условиях и дать рекомендации к проектирова-нию транспортно-погрузочных средств с автоматическим управлением движе-ния.

Общая методика исследования: теоретический анализ объекта исследова-ния в процессе изменения направления движения; экспериментальное иссле-дование промышленных колесных транспортно-погрузочных средств; матема-тическое моделирование на ЭВМ; макетирование разработанной системы и исследование методом полунатурного моделирования; изготовление опыт-ного образца системы автоматического управления движением и натурные ис-пытания в производственных условиях.

Объект исследования: электрические (аккумуляторные) колесные тран-спортно-погрузочные средства с прицепами и без прицепов.

Научная новизна: аналитически и экспериментально исследована дина-мика многосвязного колесного транспортного средства в процессе измене-ния направления движения, оценено влияние изменения числа прицепов на структуру математической модели многосвязника как объекта управления; разработана методика вычисления численных значений коэффициентов моде-ли одиночных и многосвязных транспортных объектов, учитывающей измене-ние числа степеней свободы, количества прицепов, массы груза и скорости перемещения; теоретически обоснована, разработана и технически реали-зована система автоматического управления движением по заданному марш-руту с использованием внутренних измеряемых переменных состояния неиз-меняемой части системы, основной режим работы которой - высокочастот-ный скользящий режим; разработана методика выбора коэффициентов функ-ции переключения, обеспечивающая заданное качество управления движени-ем при переменных режимах транспортирования.

Практическое значение результатов. Разработанные модели, измери-тельно-регистрирующая аппаратура и методика исследования позволяют ко-личественно оценивать динамику процесса управления одиночных и много-связных транспортных средств и использовать их при конструировании

транспортно-погрузочных средств с желаемыми динамическими свойствами. Разработанная система автоматического управления обеспечивает движение с высокой точностью по замкнутому маршруту, состоящему из прямолинейных и криволинейных участков, включая повороты, при изменении количества прицепов, массы груза и скорости перемещения, и позволяет существенно увеличить коэффициент использования полезной площади складов за счет обеспечения коридоров движения 1,5 м и менее.

Апробация работы. Проверка положений, разработанных в диссертации, проводилась в ходе выполнения научно-исследовательских работ. Основные результаты внедрены в ЦНИИАП НАМИ и переданы ВНИИЭлектротранспорту для проектирования аккумуляторных малогабаритных тягачей с автоматическим управлением, докладывались на респ. научн.-техн. конференции по средствам и системам автоматического управления, г. Севастополь (1972 г.), на сек-ции "Кибернетика и автоматическое управление" Научного совета по проб-леме "Кибернетика" АН УССР, г. Одесса (1976 г.), на научн.-техн. конфе-ренциях ОТИП (1974, 1977 гг.), на респ. научн.-техн. конференции по фи-зическим основам построения первичных измерительных преобразователей, г. Винница (1977 г.).

Публикация результатов. Основные результаты изложены и опублико-ваны в 12 работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и приложений, изложена на 135 страницах машинописного текста, включает 63 рисунка, 10 таблиц. Библиография содержит 120 наименований.

П. РАЗВИТИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН, РАБОТАЮЩИХ В СКЛАДСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Для каждой отрасли пищевой промышленности в настоящее время разра-батываются оптимальные типовые транспортно-технологические схемы, эффек-тивность которых в значительной степени определяется наличием складских площадей (крытые сырьевые площадки, склады готовой продукции и обрат-ной тары и др.). К параметрам, определяющим эффективность использования складских помещений, относится коэффициент использования полезной пло-щади склада. Он в значительной мере определяется вспомогательной пло-щадью, необходимой для проездов, и в зависимости от типоразмера транс-портных средств отнимает 70+80% от полезной площади. Для снижения по-терь полезной площади складов используется новый принцип раздельного выполнения операций, реализованный в складе стеллажного хранения "Ро-бот-система".

Другая реализация этого принципа, более гибкая, может быть осуществлена с помощью тягача с прицепами и мостовых кранов-штабелеров. В этом случае ширина проездов определяется типоразмером кранов-штабелеров, которая значительно меньше, чем при использовании электропогрузчиков и электроштабелеров. Многократное движение с ручным управлением в таких стесненных условиях, с учетом низкой квалификации данной категории работников, не дает возможность использовать минимальные размеры проездов.

Наиболее распространен на практике электромагнитный способ задания предписанного маршрута, который позволяет эксплуатировать систему автоматического управления движением (САУД) как внутри помещений, так и на участках цех-склад.

В СССР разработкой САУД безрельсовых транспортных средств внутри предприятий занимается ЦКДТБ Мин.лег.пром. Латв.ССР и ВНИИЭлектротранспорт. Кроме того, имеются теоретические и опытные разработки в области автоматического управления движением сельскохозяйственных машин (НАТИ, УкрНИИСХОМ и др.), автомобилей при полигонных испытаниях (НАМИ, МАДИ и др.). Однако движение сельскохозяйственных машин выполняется по существенно неровной и деформируемой поверхности (пахоте) и связано с обработкой площади. Результаты автоматизации управления движением автомобиля выявили сложность исследуемого объекта и недостаточность изученности его как объекта автоматического управления.

Использование известных СУ, у нас и за рубежом (программных для управления станками, следящих для управления приводом, позиционных стабилизирующих для управления приводом и т.д.), приводит к неэффективным решениям. В разработанных САУД колесных транспортно-погрузочных средств, применяемых в складских и производственных помещениях, отсутствие исследования свойств самого объекта и упрощенное представление его в виде поступательного движения материальной точки приводит к тому, что качество автоматического управления движением уступает ручному: скорости перемещения в автоматическом режиме значительно ниже, переход с прямолинейного участка на криволинейный осуществляется либо при полной остановке либо значительном снижении скорости перемещения, ширина проездов сохраняется такой же, как и при ручном управлении. Часто систему ориентации отождествляют с САУД, хотя она является информационно-измерительной, систему управления скоростью перемещения отождествляют с системой управления направлением движения.

В работе даны требования к САУД в условиях складов и производственных помещений, классификация известных САУД по способу считывания маршрута,

формирования, передачи и преобразования сигнала ошибки.

Опыт создания СУ движением (автопилотов, авторулевых) свидетельствует о том, что разработка качественной системы управления не может быть осуществлена без решения задачи идентификации объекта. Специфической особенностью колесных транспортно-погрузочных средств, не имеющих аналогов среди известных, автоматически управляемых мобильных объектов (летательных аппаратов, кораблей и др.), является многозвенность - шарнирно сочлененные прицепы, которые ухудшают управляемость объекта.

Ш. МОДЕЛЬ КОЛЕСНОГО ТРАНСПОРТНО-ПОГРУЗОЧНОГО СРЕДСТВА КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Процесс управления движением транспортного средства включает процесс изменения величины вектора скорости и процесс изменения направления вектора скорости центра масс. Разделение общего движения и исследование каждого вида в отдельности возможно, так как инерционные связи между ними при имеющихся скоростях малы, тяговое усилие и вертикальные нагрузки на точки опоры могут быть приняты постоянными, при этом характеристики шин становятся независимыми от них.

Используя связанную с центром масс объекта подвижную и неподвижную системы координат, объект управления описывается различными моделями, в зависимости от числа учитываемых степеней свободы. Движение транспортного средства в результате изменения направления вектора скорости описывается боковым движением, характеризуемым переменными u , ω_a , ω_r , где u - линейная скорость бокового перемещения, обусловленная гибкой связью между точками опоры и дорогой, ω_a - угловая скорость относительно вертикальной оси, ω_r - угловая скорость относительно продольной оси, обусловленная гибкой связью между ходовой частью и корпусом.

При движении с фиксированной скоростью и условии, что правые и левые колеса обладают одинаковыми свойствами и сцепление с дорогой не нарушается, боковое движение центра масс с тремя степенями свободы описывается в угловых переменных:

$$\left. \begin{aligned} (A_{11}p + A_{10})\beta(p) + B_{11}p\alpha(p) + (F_{11}p + F_{10})\gamma(p) &= -C_1\varphi_k(p); \\ A_{20}\beta(p) + (B_{22}p^2 + B_{21}p)\alpha(p) + (F_{22}p^2 + F_{21}p + F_{20})\gamma(p) &= -K\varphi_k(p); \\ A_{31}p\beta(p) + (B_{32}p^2 + B_{31}p)\alpha(p) + (F_{32}p^2 + F_{31}p + F_{30})\gamma(p) &= 0, \end{aligned} \right\} (1)$$

где γ - угол крена, в рад; α - угол курса, в рад; β - угол бокового сноса (угол между вектором скорости центра масс объекта и его продольной плоскостью симметрии), в рад; φ_k - угол поворота управляемых колес,

в рад; $\beta(p)$, $\alpha(p)$, $\gamma(p)$, $\varphi_k(p)$ - изображения соответствующих переменных; A, B, F, C_1, K - коэффициенты, связанные аналитическими соотношениями с конструктивными и режимными параметрами объекта; P - оператор Лапласа.

Из (I) определяются передаточные функции по трем каналам: бокового сноса, крена, курса. Относительно заданного маршрута (кабеля) транспортно-погрузочное средство характеризуется линейным отклонением центра масс y_0 и углом $\Theta = \alpha + \beta$, а канал крена образует перекрестные связи между каналами бокового сноса и курса. Следовательно, процесс управления направлением движения одиночного транспортного средства описывается передаточными функциями

$$\left. \begin{aligned} W_{\varphi_k-\beta} &= \frac{K_\beta (T_{3\beta} p^3 + T_{2\beta} p^2 + T_{1\beta} p + 1)}{T_4 p^4 + T_3 p^3 + T_2 p^2 + T_1 p + 1}; \\ W_{\varphi_k-\alpha} &= \frac{K_\alpha (T_{3\alpha} p^3 + T_{2\alpha} p^2 + T_{1\alpha} p + 1)}{p(T_4 p^4 + T_3 p^3 + T_2 p^2 + T_1 p + 1)}; \\ W_{\varphi_k-\Theta} &= W_{\varphi_k-\beta} + W_{\varphi_k-\alpha}; \quad W_{\varphi_k-y_0} = V W_{\varphi_k-\Theta} / p, \end{aligned} \right\} (2)$$

где динамические коэффициенты $K_\beta, K_\alpha, T_{i\beta}, T_{i\alpha}$; связаны аналитическими соотношениями с конструктивными и режимными параметрами объекта, приведенными в работе.

При отсутствии крена объект описывается моделью с двумя степенями свободы и передаточные функции относительно переменных Θ и y_0 имеют вид

$$W_{\varphi_k-\Theta} = \frac{K_\alpha (T_{2\Theta} p^2 + T_{1\Theta} p + 1)}{p(T_2 p^2 + T_1 p + 1)}; \quad W_{\varphi_k-y_0} = \frac{V}{p} W_{\varphi_k-\Theta}; \quad (3)$$

где динамические коэффициенты связаны другими аналитическими соотношениями с параметрами объекта.

При отсутствии бокового сноса объект обладает только одной степенью свободы и передаточные функции модели имеют вид

$$W_{\varphi_k-\Theta} = \frac{K_\alpha}{p(T_1 p + 1)}; \quad W_{\varphi_k-y_0} = \frac{V}{p} W_{\varphi_k-\Theta}, \quad (4)$$

где динамические коэффициенты также связаны другими аналитическими соотношениями с параметрами объекта.

Большинство промышленных складских и цеховых погрузчиков и тягачей работают на ровных твердых покрытиях, внешние воздействия со стороны дороги постоянны, известны (уклоны при въездах, точки при переездах рельсовых путей и т.д.) и имеют кратковременное действие, а диапазон скоростей перемещения внутри производственных территорий составляет (4+18)

км/час. Следовательно, модель с двумя степенями свободы (3) отражает динамические свойства транспорта на пневматическом ходу, а модель с одной степенью свободы (4) - на сплошных резиновых шинах.

Вследствие нестабильности характеристик аккумуляторных батарей, к концу смены наблюдается снижение скорости перемещения до $0,5 V_{\text{ном}}$ и ниже. В процессе погрузки-разгрузки меняются масса, положение центра масс, моменты инерции, однако скорость протекания переходных процессов во много раз превосходит скорость изменения коэффициентов модели объекта, поэтому модель можно считать стационарной, коэффициенты которой принимают фиксированные значения внутри известного диапазона.

Второй характерной особенностью транспортно-погрузочных средств, работающих в производственных помещениях, является многозвенность. Прицепы, применяемые в складском и внутризаводском транспорте, не имеют органов управления со стороны тягача, в отличие от автомобильных поездов, где у прицепов могут быть управляемые колеса и тормозные устройства.

Проведенные исследования объекта с I+3 прицепами позволили получить модель многозвенника, выявить закономерности структуры и обобщить ее на K-прицепов. Модели тягача с прицепами получены при тех же допущениях, что и для одиночных объектов, и отсутствии крена. Сцепное устройство придает системе дополнительную степень свободы, характеризуемую изменением угла между продольными осями звеньев Ψ_i , скоростью и ускорением по этой переменной $\dot{\Psi}_i, \ddot{\Psi}_i$. При малых изменениях получены уравнения бокового движения центра масс тягача с I+3 прицепами и K-прицепов, из которых для транспортных средств на массивных шинах (при отсутствии бокового сноса) получены передаточные функции относительно Θ и y :

а) тягач с одним прицепом

$$\left. \begin{aligned} W_{\varphi_k-\Theta}^I &= \frac{K_\alpha^I (T_{2\alpha}^I p^2 + T_{1\alpha}^I p + 1)}{p(T_3^I p^3 + T_2^I p^2 + T_1^I p + 1)}; \\ W_{\varphi_k-y}^I &= \frac{V(T_4 p + 1)}{p} \cdot W_{\varphi_k-\Theta}^I; \end{aligned} \right\} (5)$$

б) тягач с двумя прицепами

$$\left. \begin{aligned} W_{\varphi_k-\Theta}^{II} &= \frac{K_\alpha^{II} (T_{4\alpha}^{II} p^4 + T_{3\alpha}^{II} p^3 + T_{2\alpha}^{II} p^2 + T_{1\alpha}^{II} p + 1)}{p(T_5^{II} p^5 + T_4^{II} p^4 + T_3^{II} p^3 + T_2^{II} p^2 + T_1^{II} p + 1)}; \\ W_{\varphi_k-y}^{II} &= \frac{V(T_4 p + 1)}{p} \cdot W_{\varphi_k-\Theta}^{II}; \end{aligned} \right\} (6)$$

в) тягач с тремя прицепами

$$W_{\varphi-\theta}^{\ddot{u}} = \frac{K_{\alpha}^{\ddot{u}} (T_{6\alpha}^{\ddot{u}} p^6 + T_{5\alpha}^{\ddot{u}} p^5 + T_{4\alpha}^{\ddot{u}} p^4 + T_{3\alpha}^{\ddot{u}} p^3 + T_{2\alpha}^{\ddot{u}} p^2 + T_{1\alpha}^{\ddot{u}} p + 1)}{p (T_7^{\ddot{u}} p^7 + T_6^{\ddot{u}} p^6 + T_5^{\ddot{u}} p^5 + T_4^{\ddot{u}} p^4 + T_3^{\ddot{u}} p^3 + T_2^{\ddot{u}} p^2 + T_1^{\ddot{u}} p + 1)}, \quad (7)$$

$$W_{\varphi-\psi}^{\ddot{u}} = \frac{V (T_y p + 1)}{p} \cdot W_{\varphi-\theta}^{\ddot{u}},$$

где динамические коэффициенты, связанные аналитическими соотношениями с параметрами тягача и прицепов и режимными условиями, приведены в работе.

Модель одиночного транспортно-погрузочного средства содержит упругое звено, описываемое дробно-рациональной частью передаточной функции, порядок которой определяется числом учитываемых степеней свободы, а динамические свойства — и полюсами, и нулями. Изменение количества прицепов приводит также к изменению порядка дробно-рациональной части передаточной функции многозвенника и перераспределению нулей и полюсов модели, изменение режимных условий — скорости перемещения и массы транспортируемого груза — только к перераспределению нулей и полюсов. На распределение нулей одиночного и многозвенного объекта можно активно воздействовать, используя переменную по линейному отклонению точки объекта, удаленной от положения центра масс. Математические модели (2)+(7) охватывают основные реальные ситуации исследуемого объекта и могут быть положены в основу вычисления коэффициентов модели, являющихся сложными многопараметрическими функциями.

В соответствии с классом линейных моделей динамика транспортно-погрузочного средства описывается характеристиками "вход-выход", используя возбуждение объекта пробным ступенчатым сигналом, величина которого не нарушает условия линейности и нормального функционирования. Аккумуляторные транспортные средства отличаются высокой чувствительностью к изменению управляющего воздействия и малой длительностью переходного процесса, поэтому аппаратура должна обладать высоким быстродействием.

Согласно сформулированным требованиям, для регистрации динамических характеристик транспортных средств был разработан измерительный комплекс аппаратуры РДХ ОТИ-1 и малогабаритный интегральный вариант РДХ-2И с улучшенными качественными характеристиками и показателями надежности. Многолучевым осциллографом одновременно записывались в функции времени: угол поворота управляемых колес φ_k , угол поворота руля φ_p , угловое отклонение от заданного направления движения θ , линейные отклонения передних точек одиночного объекта y и прицепов y_1, y_2, y_3 . В аппаратуре предусмотрена возможность исследования и других параметров движущегося объекта.

Линейное отклонение от заданного направления движения измерялось индукционными первичными преобразователями, собранными по амплитудно-разностной схеме.

Основным источником погрешности, снижающей качество получаемой информации, являются случайные изменения начального значения регистрируемого параметра в режиме прямолинейного исходного движения объекта по кабелю и нелинейность характеристик измерительных каналов.

Высокое качество получаемой информации достигалось с помощью электронных измерительных каналов с автоматической компенсацией начальных значений регистрируемых параметров, использованием активных RC-фильтров нижних частот, обеспечения контроля исправности каналов и превышения допустимого уровня записи.

Экспериментальное исследование проводилось на предприятии, в цехе внутривзаводского транспорта. Были сняты динамические характеристики тягача АТ-60 с прицепами и без них, электросамосвала ЕС-301, вилочных погрузчиков ЭИ-103 и 4015М. Объекты исследовались в порожнем и загруженном до номинального значения состояниях.

Соответствие модели и реального объекта, возбуждаемых одним и тем же входным сигналом, определялось ошибкой, а в качестве меры соответствия использовался минимум интегральной абсолютной ошибки на интервале наблюдения. Для одиночных объектов на массивных шинах использовалась модель (4), электросамосвала — (3), тягача с 1+3 прицепами — соответственно (5)+(7).

Реакция объекта по линейному отклонению передней точки корпуса на ступенчатое воздействие описывается дробно-рациональной функцией, которую можно записать в виде ряда, осуществив деление числителя на знаменатель:

$$h_y(p) = q_1 p^{-3} + q_2 p^{-4} + q_3 p^{-5} + \dots \quad (8)$$

Коэффициенты (8) связаны с искомыми динамическими параметрами рекуррентными соотношениями. Изображению (8) соответствует оригинал во временной области $y(t)$

$$y(t) = (q_1/2!)t^2 + (q_2/3!)t^3 + (q_3/4!)t^4 + \dots \quad (9)$$

Аппроксимирующую функцию экспериментальной характеристики по линейному отклонению передней точки объекта ищем в виде степенного ряда, число членов которого ограничиваем числом неизвестных коэффициентов:

$$y_{an}(t) = x_1 t^2 + x_2 t^3 + x_3 t^4 + \dots \quad (10)$$

Численные значения коэффициентов x_i в (10) находим методом точечной аппроксимации либо методом наименьших квадратов и приравниваем коэффициентам (9). Решая систему линейных алгебраических уравнений, находим искомые коэффициенты. Из экспериментальных записей реакции объекта по угловому отклонению вычисляем коэффициент передачи K_α и фактическую скорость перемещения объекта. В работе дан алгоритм вычисления коэффициентов модели и результаты, а в приложении - рабочие программы обработки экспериментальных переходных функций на ЭЦМ "Наири-К". Для проверки соответствия модели и реального объекта после определения коэффициентов (10) вычислялись невязки в интервале измерения (0±0,95) с. Относительная погрешность вычисления при определении наибольшего количества параметров в модели (7) не превышала 1%.

Об изменении порядка модели многозвенника с увеличением числа прицепов можно судить по изменению кривизны и характера реакции объекта. Существенная колебательность присуща замыкающему звену. Если это звено становится промежуточным, его колебательность резко падает. За счет измерения линейного отклонения точки объекта, удаленной на расстоянии R от положения центра масс, происходит выравнивание порядка числителя и знаменателя дробно-рациональной функции и компенсации полюсов нулями. В табл. I приведены нули и полюсы многозвенника, вычисленные на ЭЦМ "Наири-К", для двух состояний - груженого и порожнего. Увеличение размерности модели поезда приводит к дополнительной структурной неустойчивости объекта, которая увеличивается при наличии груза. Однако часть полюсов полностью или частично компенсируются нулями и целесообразно упругие свойства транспортно-погрузочных средств аппроксимировать эквивалентным звеном более низкого порядка (не выше второго).

Используя способ понижения дифференциального уравнения по критерию приближения переходных функций и наблюдаемую компенсацию полюсов нулями, упругие свойства аккумуляторных транспортных средств аппроксимированы эквивалентным инерционно-форсирующим звеном первого порядка. В работе приведена таблица с численными значениями коэффициентов эквивалентной модели многозвенника. Диапазон изменения эквивалентных динамических коэффициентов значительно шире при изменении режима работы многозвенника, чем в модели высокого порядка. Так, коэффициент передачи по линейному отклонению эквивалентной модели изменяется в 14 раз, постоянные времени упругого звена - в 4+5 раза. С учетом паспортных данных и наблюдений за фактическим режимом в течение смены для синтеза САУД рекомендована единая эквивалентная модель и диапазон изменения ее параметров, учитывающий наиболее существенные режимы работы транспортно-погрузочных ма-

шин, грузоподъемностью до 1,5 т.

Таблица I. Распределение нулей и полюсов многозвенника.

Кол-во прицепов!	Нули	Полюсы	Примечания
0	$! \lambda_1 = - 2,066$	$! P_1 = - 5,208$! тягач
1	$! \lambda_1 = - 1,745$	$! P_1 = - 2,56$! С гру-
	$! \lambda_2 = - 26,296$	$! P_2 = - 15,196$! зом 0,5т
	$! \lambda_3 = - 48,118$	$! P_3 = - 60,047$!
2	$! \lambda_1 = - 2,986$	$! P_{1,2} = - 4,95 \pm 2,48i$! Без
	$! \lambda_2 = - 17,258$	$! P_3 = - 125,485$! груза
	$! \lambda_3 = - 81,865$!	!
	$! \lambda_1 = - 3,82$	$! P_1 = - 5,00$! С гру-
	$! \lambda_{2,3} = 3,98 \pm 10,27i$	$! P_{2,3} = 3,48 \pm 9,78i$! зом 1 т
3	$! \lambda_4 = - 9,8$!	!
	$! \lambda_5 = - 10,916$	$! P_{4,5} = - 6,88 \pm 5,15i$!
	$! \lambda_1 = - 3,393$	$! P_{1,2} = - 0,34 \pm 11,755i$! Без
	$! \lambda_{2,3} = 1,626 \pm 16,306i$	$! P_{3,4} = - 8,605 \pm 7,036i$! груза
	$! \lambda_{4,5} = - 11,311 \pm 9,751i$	$! P_5 = - 10,021$!
3	$! \lambda_{1,2} = - 2,174 \pm 9,66i$	$! P_1 = - 3,052$! С гру-
	$! \lambda_{3,4} = - 5,075 \pm 3,066i$	$! P_{2,3} = - 20,393 \pm 19,107i$! зом 1,5т
	$! \lambda_{5,6} = 2,256 \pm 13,634i$	$! P_{4,5} = 0,2 \pm 4,326i$!
	$! \lambda_7 = - 87,384$	$! P_{6,7} = 13,11 \pm 24,715i$!
	$! \lambda_1 = - 8,761$	$! P_1 = - 13,23$! Без
	$! \lambda_{2,3} = - 6,714 \pm 6,398i$	$! P_{2,3} = - 0,275 \pm 8,605i$! груза
	$! \lambda_{4,5} = - 2,757 \pm 9,877i$	$! P_{4,5} = - 4,861 \pm 5,044i$!
$! \lambda_{6,7} = 10,68 \pm 13,244i$	$! P_{6,7} = 8,581 \pm 15,894i$!	

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И ЕЕ ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Анализируя процесс управления транспортным средством, осуществляемый человеком и нелинейными управляющими устройствами (УУ), предлагаемыми различными авторами, показано, что использование нелинейных систем с разрывным управлением, работающих в скользком режиме, открывает возможность качественного управления структурно неустойчивого объекта с переменными параметрами. Неопределенность внешней среды и недостаточ-

ность полезной информации могут быть скомпенсированы многообразием состояний и значений параметров УУ. Выбор нужного состояния и значения в соответствии с заданной целью осуществляют логические элементы.

Предлагается структура многомерного УУ в пространстве переменных состояния неизменяемой части системы, доступных непосредственному измерению. Такой подход дает существенный выигрыш в реализации системы с переменной структурой, но ценой потери независимости скользящего режима от параметров объекта.

В качестве новых переменных состояния предлагаются линейное отклонение от заданного маршрута передней точки корпуса объекта $y - y_{зд} = \varepsilon = x_1$, угловое отклонение от предписанного направления $\theta = x_2$, скорость изменения углового отклонения $\dot{\theta} = x_3$, угол поворота выходного вала исполнительного механизма (ИМ), кинематически связанного с управляемыми колесами, $\varphi = x_4$, скорость изменения угла поворота ИМ $\dot{\varphi} = x_5$.

САУД в пространстве выбранных переменных состояния описывается системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -K_y x_2 - K_y T_y x_3; \\ \dot{x}_2 &= x_3; \\ \dot{x}_3 &= -(1/T_1) x_3 + (K_\alpha/T_1) x_4; \\ \dot{x}_4 &= x_5; \\ \dot{x}_5 &= -(1/T_{ИМ}) x_5 - (K_{ИМ}/T_{ИМ}) u, \end{aligned} \right\} \quad (II)$$

$$u = \sum_{i=1}^4 \psi_i^* x_i; \quad (I2)$$

$$\psi_i^* = \begin{cases} \alpha_i^* & \text{при } s x_i > 0 \\ \beta_i^* & \text{при } s x_i < 0, \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (I3)$$

$$s = \sum_{i=1}^5 C_i^* x_i, \quad C_5^* = 1, \quad (I4)$$

где K_y , K_α , T_y и T_1 принимают фиксированные значения внутри заданного диапазона изменения.

Для системы (II)+(I4) получены аналитические выражения условий существования скользящего режима, устойчивости его и заданного качества, связывающие параметры неизменяемой части системы с коэффициентами УУ.

На скорость скольжения влияют положение гиперплоскости скольжения в пространстве переменных и углы вхождения фазовых траекторий конкрет- ных структур в гиперплоскость скольжения. Целесообразно воздействовать

на коэффициенты функции переключения (I4), так как при этом происходит одновременное изменение положения гиперплоскости скольжения и углов вхождения фазовых траекторий за счет нелинейности последних.

Переходные процессы в САУД, регистрируемые многолучевым осциллографом, показали, что практически весь переходный процесс протекает в высокочастотном скользящем режиме. Выход объекта на заданную траекторию движения из области максимально допустимых отклонений заканчивается через 0,95 с, а затем объект без ошибки воспроизводит маршрут. Характер изменения всех переменных неизменяемой части системы свидетельствует о том, что в скользящем режиме система ведет себя как линейная и описывается системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_i &= x_{i+1}, \quad i = 1, 2, 3, \\ \dot{x}_4 &= -(C_4^* + 1/T_1) x_4 - \frac{1}{T_1} (C_3^* K_\alpha + C_4^*) x_3 - \\ &\quad - \frac{K_\alpha}{T_1} (C_1^* K_y T_y + C_2^*) x_2 - \frac{K_\alpha}{T_1} C_1^* T_y x_1. \end{aligned} \right\} \quad (I5)$$

Общая оценка качества переходного процесса получена с помощью интегрального квадратичного критерия сближения I на заданном интервале. Оптимальные значения коэффициентов гиперплоскости скольжения, обеспечивающие наименьшее время управления для всего диапазона изменения параметров объекта и заданной точности воспроизведения маршрута, вычислялись на ЭЦВМ "Наири-К" с помощью функциональной зависимости $I = f(C_1^*, C_2^*, C_3^*, C_4^*)$, полученной при исследовании САУД, и траекторий корневой системы (I5) $P_i = f(C_1^*, C_2^*, C_3^*, C_4^*)$, $i = 1, 2, 3, 4$ для двух предельных параметрических режимов, один из которых (максимальный) приведен на рис. I. Направления движения корней при изменении коэффициентов функции переключения определяют положение области минимальных значений I , которой соответствуют коэффициенты гиперплоскости скольжения $C_1^* = 47,5 + 52,2$, $C_2^* = 0 + 11$, $C_3^* = 60$, $C_4^* = 10$, $C_5^* = 1$, обеспечивающие наилучшее качество управления для обоих предельных параметрических режимов объекта.

Для более реальной оценки возможностей системы в работе проведено исследование качества САУД при наличии запаздывания и помех в каналах информации. Нелинейность системы с переменной структурой проявляется в том, что она не безразлична к положению звена запаздывания. Наибольшее ухудшение качества САУД дает запаздывание, вносимое ИМ. Допустимая величина запаздывания ИМ не должна превышать 0,1 с. Запаздывание, вносимое объектом в пределах 0,1 + 0,5 сек практически не влияет на качество работы системы.

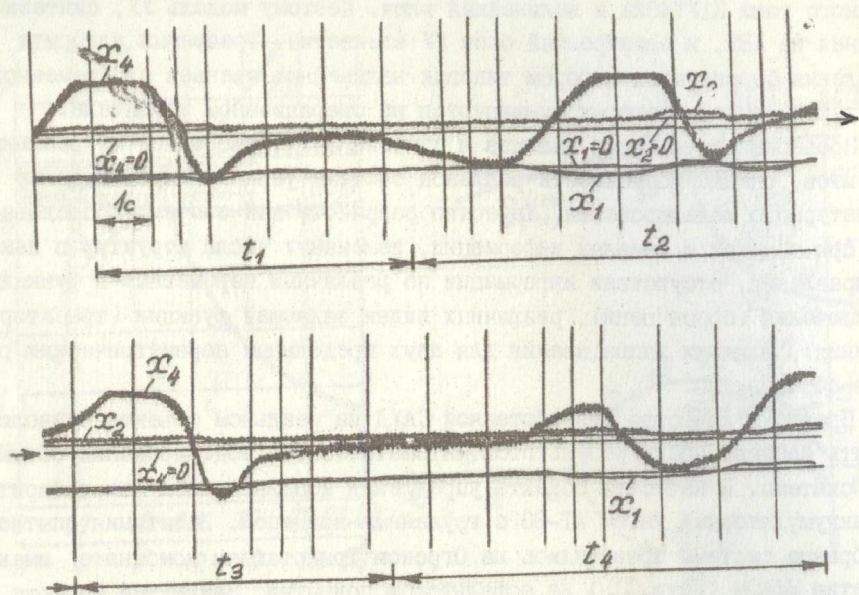


Рис. 2. Результаты натуральных испытаний системы автоматического управления движением малогабаритным тягачем АТ-60.

максимальное угловое отклонение — около 2° .

В отличие от автопилотов и авторулевых, выпускаемых серийно, автоматические устройства для управления движением транспортно-погрузочных средств в производственных условиях отсутствуют. Поэтому ожидаемый экономический эффект оценивается от основной части расходов — заработной платы рабочих, занятых на транспортных работах. При двухсменной работе ожидаемый экономический эффект от автоматизации одной единицы оборудования составляет 2649 руб., из сферы вспомогательного производства высвобождаются два человека, дополнительные капитальные затраты окупаются за 0,22 года. Кроме высвобождения трудовых ресурсов и экономии фонда заработной платы, в складах со стеллажным и штабельным хранением грузов использование автоматически управляемых тягачей АТ-60 с прицепами и подвесных кранов-штабелеров позволяет уменьшить проезды до 1,5 м, при этом коэффициент использования полезной площади склада увеличивается до 0,58 (если первоначальная ширина проездов была 2,5 м). Маршруты для тягача могут замыкаться либо вне склада (сквозная система), либо

внутри склада (замкнутая система). За счет обеспечения высокой точности воспроизведения маршрута имеется возможность уменьшить предельно допустимые отклонения и сделать проезды для тягача АТ-60 менее 1,5 м.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Исследования динамики управления одиночного и многосвязного транспортного средства как объекта автоматического управления движением показали, что действие шарнирно сочлененных прицепов аналогично действию дополнительных упругих связей. Изменение количества прицепов и массы транспортируемого груза приводят к изменению порядка дробно-рациональной части передаточной функции объекта, перераспределению нулей и полюсов модели и структурной неустойчивости объекта.

2. Предложена методика и разработана измерительно-регистрающая аппаратура для количественной оценки динамики управления одиночных и многосвязных транспортно-погрузочных средств, позволяющая определить численные значения коэффициентов модели, являющихся сложными многопараметрическими функциями.

3. В результате экспериментального исследования промышленных аккумуляторных транспортно-погрузочных средств в груженом и порожнем состоянии, с прицепами и без них, установлено, что за счет компенсации полюсов нулями динамику транспортной машины по линейному отклонению можно описать эквивалентной единой моделью с астатизмом второго порядка, упругие свойства которой аппроксимируются инерционно-форсирующим звеном первого порядка, а эквивалентные коэффициенты модели определяются количеством прицепов, степенью загруженности и скоростью перемещения.

4. Теоретические исследования САУД определили структуру системы и состав информации, необходимой для нормального функционирования системы в высокочастотном скользком режиме, содержащей измерительные каналы линейного и углового отклонения центра масс объекта, скорости изменения углового отклонения, угла поворота управляемых колес и скорости изменения угла поворота управляемых колес.

5. Полученные аналитические выражения условий существования, устойчивости скользкого режима и критерия качества САУД с использованием внутренних измеряемых переменных состояния позволяют рассчитать параметры УУ, в частности, определить оптимальные коэффициенты функции переключения, обеспечивающие высокочастотный скользкий режим, при котором система управления воспроизводит маршрут без ошибки для всего диапазона изменения режимных условий.

6. Результаты математического, полунатурного и натурального исследования подтвердили предложенную модель объекта: коэффициенты управляющего устройства, выбранные по результатам идентификации объекта и анализа системы, обеспечили ожидаемое качество управления. В условиях линейности модели воспроизведение маршрута осуществляется без ошибки, в условиях нелинейности модели — максимальная ошибка по линейному отклонению центра масс $\Delta X_{\text{Тмакс}} = 2,5$ см, углу зому — $\Delta X_{2\text{макс}} = 2^\circ$.

7. Разработанная САУД обеспечивает минимальную ширину проездов для данного типоразмера транспортного оборудования, позволяет существенно увеличить коэффициент использования полезной площади складов и сократить число обслуживающего персонала при выполнении транспортных работ внутри предприятий.

Основные результаты отражены в следующих материалах и публикациях:

1. Применение принципа переменности структуры к построению адаптивной системы автовождения. Тезисы респ. научн.-техн. конф. по средствам и системам управления, изд. УкрНИИТИ, Киев, 1972, с.35-37 (соавторы Драгаев В.П., Кринацкий И.И.).

2. Исследование и разработка измерительной аппаратуры для исследования динамических характеристик колесных машин. Отчет о НИР, № гос. регистр. 72034246, ОТИП, Одесса, 1973 (соавторы Гончаренко А.Е. и др.).

3. Синтез регулятора переменной структуры с использованием внутренних координат состояния объекта управления. Сб. "Адаптивные системы автоматического управления", вып.2, изд. "Техніка", Киев, 1974, с.87-94 (соавтор Платонов П.Н.).

4. Устройство для регистрации динамических характеристик колесных транспортных средств. Автор.свид. №495579, Бюллетень №46, 1975 (соавторы Платонов П.Н. и др.).

5. Измерительный комплекс аппаратуры для исследования динамических характеристик колесных транспортных средств. Реферат.информ. о законченных НИР в вузах УССР, "Радиоэлектроника, автоматика и связь", вып.8, изд. "Вища школа", Киев, 1975, с.50-52 (соавторы Гончаренко А.Е. и др.).

6. Определение динамических характеристик автомобиля как объекта в системе автоматического вождения, "Автомобильная промышленность", №10, 1975, с.22-24 (соавторы Драгаев В.П., Майборода О.В.).

7. Устройство автоматического управления движением транспортного средства. Автор.свид. №471872, Бюллетень № 20, 1975 (соавторы Платонов П.Н. и др.).

8. Система автоматического управления по параметру скользящего режима. Сб. "Адаптивные системы автоматического управления", вып.3, изд. "Техніка", Киев, с.53-59 (соавторы Платонов П.Н. и др.).

9. Создание измерительно-регистрирующего комплекса аппаратуры для сбора информации о параметрах движения колесных транспортных машин. Раздел I. Отчет о НИР, № гос.регистр. 74051058, ОТИП, Одесса, 1977.

10. Устройство для регистрации динамических характеристик колесных транспортных средств. Автор.свид. по заявке №2435837/25-II, заявлено 30.12.76, положительное решение от 13.06.77 (соавторы Драгаев В.П., Галлулин А.А.).

II. Первичные преобразователи и измерительная аппаратура для исследования динамики колесных транспортных средств. Тезисы респ. научн.-техн. конф. по физическим основам построения первичных измерительных преобразователей, Винница, 1977, изд. института электродинамики АН УССР, Киев, 1977, с.66 (соавторы Гончаренко А.Е., Галлулин А.А.).

12. Измерительные преобразователи для определения курсового угла транспортных средств. Там же, с.66-67 (соавторы Галлулин А.А. и др.).

6. Результаты математического, полунатурного и натурального исследования подтвердили предложенную модель объекта: коэффициенты управляющего устройства, выбранные по результатам идентификации объекта и анализа системы, обеспечили ожидаемое качество управления. В условиях линейности модели воспроизведение маршрута осуществляется без ошибки, в условиях нелинейности модели — максимальная ошибка по линейному отклонению центра масс $\Delta X_{1\text{макс}} = 2,5 \text{ см}$, углу зому — $\Delta X_{2\text{макс}} = 2^\circ$.

7. Разработанная САУД обеспечивает минимальную ширину проездов для данного типоразмера транспортного оборудования, позволяет существенно увеличить коэффициент использования полезной площади складов и сократить число обслуживающего персонала при выполнении транспортных работ внутри предприятий.

Основные результаты отражены в следующих материалах и публикациях:

1. Применение принципа переменности структуры к построению адаптивной системы автовождения. Тезисы респ. научн.-техн. конф. по средствам и системам управления, изд. УкрНИИТИ, Киев, 1972, с.35-37 (соавторы Драгаев В.П., Крицацкий И.И.).

2. Исследование и разработка измерительной аппаратуры для исследования динамических характеристик колесных машин. Отчет о НИР, № гос. регистр. 72034246, ОТИШ, Одесса, 1973 (соавторы Гончаренко А.Е. и др.).

3. Синтез регулятора переменной структуры с использованием внутренних координат состояния объекта управления. Сб. "Адаптивные системы автоматического управления", вып.2, изд. "Техніка", Киев, 1974, с.87-94 (соавтор Платонов П.Н.).

4. Устройство для регистрации динамических характеристик колесных транспортных средств. Автор. свид. №495579, Бюллетень №46, 1975 (соавторы Платонов П.Н. и др.).

5. Измерительный комплекс аппаратуры для исследования динамических характеристик колесных транспортных средств. Реферат. информ. о законченных НИР в вузах УССР, "Радиоэлектроника, автоматика и связь", вып.8, изд. "Вища школа", Киев, 1975, с.50-52 (соавторы Гончаренко А.Е. и др.).

6. Определение динамических характеристик автомобиля как объекта в системе автоматического вождения, "Автомобильная промышленность", №10, 1975, с.22-24 (соавторы Драгаев В.П., Майборода О.В.).

7. Устройство автоматического управления движением транспортного средства. Автор. свид. №471872, Бюллетень № 20, 1975 (соавторы Платонов П.Н. и др.).

8. Система автоматического управления по параметру скользящего режима. Сб. "Адаптивные системы автоматического управления", вып.3, изд. "Техніка", Киев, с.53-59 (соавторы Платонов П.Н. и др.).

9. Создание измерительно-регистрирующего комплекса аппаратуры для сбора информации о параметрах движения колесных транспортных машин. Раздел I. Отчет о НИР, № гос. регистр. 74051058, ОТИШ, Одесса, 1977.

10. Устройство для регистрации динамических характеристик колесных транспортных средств. Автор. свид. по заявке №2435837/25-II, заявлено 30.12.76, положительное решение от 13.06.77 (соавторы Драгаев В.П., Галиулин А.А.).

11. Первичные преобразователи и измерительная аппаратура для исследования динамики колесных транспортных средств. Тезисы респ. научн.-техн. конф. по физическим основам построения первичных измерительных преобразователей, Винница, 1977, изд. института электродинамики АН УССР, Киев, 1977, с.66 (соавторы Гончаренко А.Е., Галиулин А.А.).

12. Измерительные преобразователи для определения курсового угла транспортных средств. Там же, с.66-67 (соавторы Галиулин А.А. и др.).