**Трояновская, Ирина Павловна. Методология моделирования криволинейного движения тракторных агрегатов : диссертация ... доктора технических наук : 05.05.03 / Трояновская Ирина Павловна; [Место защиты: ГОУВПО "Южно-Уральский государственный университет"].- Челябинск, 2011.- 329 с.: ил. РГБ ОД, 71 12-5/145**

*На правах рукописи*

**05201151315**

ТРОЯНОВСКАЯ ИРИНА ПАВЛОВНА

**МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ
ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ**

Специальности 05.05.03 - Колесные и гусеничные машины

1. - Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант д.т.н., профессор Позин Б.М.

Челябинск - 2011

**СОДЕРЖАНИЕ**

[Введение 6](#bookmark2)

[Принятые обозначения 14](#bookmark1)

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ 17

1. [Классификация тракторных агрегатов 18](#bookmark43)
2. [Требования ТА к исследованию поворота 26](#bookmark44)
3. Основные задачи теории поворота 28
4. Принципы построения моделей поворота 30
5. [Модели взаимодействия гусеницы с грунтом 33](#bookmark45)
6. [Классическое направление 33](#bookmark46)
7. [Теоретический метод учета деформации грунта 35](#bookmark48)
8. [Эмпирический метод учета деформации грунта 39](#bookmark49)
9. [Гусеничный ход Ф.А. Опейко 40](#bookmark50)
10. [Взаимодействие колеса,с грунтом на повороте 44](#bookmark51)
11. [Модели поворота с неповоротными колесами 44](#bookmark52)
12. [Модели поворота с управляемыми колесами 49](#bookmark53)
13. [Теория бокового увода 50](#bookmark54)
14. [Угловой увод колеса 53](#bookmark55)
15. [Модели с учетом скольжения 54](#bookmark56)
16. [Проблемная ситуация 60](#bookmark57)
17. Цель и задачи исследования 61

ГЛАВА 2. СИЛОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВИЖИТЕЛЯ

С ГРУНТОМ 63

1. [Основы математической теории трения 64](#bookmark60)
2. [Учет формы и размеров контакта 67](#bookmark62)
3. [Введение закона нормального давления в контакте 70](#bookmark63)
4. [Влияние анизотропии 73](#bookmark65)
5. [Учет упругости в контакте движителя с грунтом 75](#bookmark66)
6. [Выбор аргумента удельной силы 77](#bookmark67)
7. Вывод закона изменения удельной силы в контакте 80
8. Оценка упругих свойств колеса 86
9. [Выводы по главе 90](#bookmark94)

ГЛАВА 3. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ НА ПОВОРОТЕ 92

1. Основные теоремы кинематики 92
2. [Теорема ортогональности для неуправляемого колеса 93](#bookmark70)
3. Момент страгивания 96
4. Теорема ортогональности для управляемого колеса 97
	1. Уравнения связей для стационарного поворота 100
		1. [Геометрические связи 101](#bookmark71)

**і**

* + 1. [Кинематические связи 104](#bookmark72)
	1. Уравнения связей для нестационарного поворота 108
		1. [Преобразование координат 110](#bookmark73)
		2. Задача скоростей управляемого колеса 113
		3. Упрощение уравнений для гусеничной машины 117
		4. Уравнения связей при постоянных управляющих

параметрах 118

* 1. Скольжение в точке контакта 120
	2. [Выводы по главе 121](#bookmark82)

ГЛАВА 4. МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ ЧАСТНЫХ

МОДЕЛЕЙ 123

1. Общий подход к составлению моделей движения 124
2. [Алгоритм решения задач криволинейного движения 125](#bookmark91)
3. [Обобщенная модель нестационарного поворота 127](#bookmark92)
4. Вычислительная процедура 131
5. Основные выходные параметры 132
6. Модель стационарного поворота 134
7. Особенности статического поворота 138
8. Квазистатический поворот 139
9. [Выводы по главе 141](#bookmark153)

[ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНОГО ПОВОРОТА 143](#bookmark95)

1. [Поворот гусеничного трактора 144](#bookmark96)
2. [Обработка результатов эксперимента 145](#bookmark97)
3. [Модель статического поворота гусеничного трактора 146](#bookmark99)
4. [Дополнительная обработка эксперимента автором 148](#bookmark100)
5. [Результаты расчета статического поворота 149](#bookmark101)
6. [Оценка адекватности модели 150](#bookmark102)
7. Сравнение собственных результатов с результатами

другими авторами 156

1. [Поворот минипогрузчика с управляемыми колесами 157](#bookmark105)
2. [Методика проведения эксперимента 159](#bookmark113)

[5.2.2.0бработка результатов эксперимента 161](#bookmark114)

1. [Модель статического поворота 163](#bookmark115)
2. [Результаты расчета 166](#bookmark117)

5.2.5.0ценка адекватности модели 166

[5.2.6.0ценка поворачиваемости минипогрузчика 167](#bookmark118)

1. Поворот тракторного поезда с двумя прицепами 169
2. [^Экспериментальные исследования поворота 170](#bookmark119)
3. [Модель статического поворота тракторного поезда 173](#bookmark120)
4. [Результаты расчета 177](#bookmark121)
5. [Адекватность модели поворота 178](#bookmark122)
6. [Поворот погрузчика с шарнирно-сочлененной рамой 179](#bookmark123)
7. [Особенности объекта исследования 179](#bookmark124)
8. Порядок проведения эксперимента 181
9. [Результаты экспериментальных исследований 184](#bookmark125)
10. [Модель статического поворота 185](#bookmark129)
11. [Методика расчета нормальных нагрузок 188](#bookmark130)
12. Оценка адекватности модели поворота 189
13. Влияние груза в ковше на характеристики поворота....192
14. [Выводы по главе 196](#bookmark133)

ГЛАВА 6. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ АКТИВНОГО ПОВОРОТА ТА...197

1. Расчет минимального радиуса поворота (поворотливость

колесного поезда с двумя вагонами) 199

1. Расчет максимальных тяговых усилий (выработка требований

к моторно-трансмиссионной установке гусеничного экскаватора).204

1. Оценка схем управления поворотом (транспортный

режим экскаватора-погрузчика) 208

1. Сравнительная оценка схемных решений (выбор области

применения малогабаритного трактора) 214

1. Расчет потерь мощности на трение (фронтальный

гидростатический погрузчик) 220

1. Построение действительной траектории движения (вход в

поворот гусеничного трактора) 224

1. Выводы к главе 232

ГЛАВА 7. СТРАГИВАНГИЕ, КАК НАЧАЛО КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ 235

* 1. [Моделирование момента страгивания 236](#bookmark155)
		1. [Активное страгивание 236](#bookmark156)
		2. [Пассивное страгивание 238](#bookmark157)
		3. [Модель предельного сдвига 238](#bookmark158)
		4. Модель динамического трогания 239
	2. Экспериментальная проверка 240
		1. Предельный сдвиг 240
		2. [Пассивный увод 244](#bookmark162)
	3. [Практические примеры задачи страгитвания 251](#bookmark163)
		1. [Расчет динамических нагрузок путепереукладчика (активное страгивание) 252](#bookmark164)
		2. Оценка нагруженности толкающих брусьев

(предельный сдвиг бульдозера) 256

* + 1. Выбор силовых гидроцилиндров (складывание

шарнирно-сочлененных ТА) 261

* + 1. Расчет усилий на рулевом колесе (поворот

*!*

малогабаритного трактора) 263

* 1. [Выводы к главе 266](#bookmark174)

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ 269

[ЛИТЕРАТУРА 274](#bookmark175)

ПРИЛОЖЕНИЯ 297

1. Акт внедрения 298
2. Образец программы для обработки эксперимента Позин Б.М. и

Гуськова В.В. (поворот с произвольным радиусом) 301

1. Программа расчета стационарного поворота малогабаритного

трактора «Уралец» в режиме с заторможенным задним внутренним колесом 302

1. Система уравнений при повороте автопоезда с двумя

тележками 307

1. Модель поворота фронтального погрузчика с ломающейся рамой

в тяговом режиме (обе оси ведущие) 313

1. Образец программы расчета характеристик поворота экскаватора- погрузчика (схема D) для оценки его статической устойчивости.317
2. Управляемый нестационарный поворот гусеничного трактора

(вход в поворот путем торможения отстающего борта) 320

1. Расчет задачи складывания (пассивного сдвига) на примере компактора (выбор силовых гидроцилиндров по значениям

максимального давления) 323

1. Программа расчета усилий на рулевом колесе

минипогрузчика 324

1. Задача страгивания путепереукладчика (5тонн) 325

**ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ[[1]](#footnote-1)**

а - угол поворота корпуса машины в неподвижной системе координат си - угол относительного поворота (складывания) частей тракторного по­езда

ап - нормальное (центростремительное) ускорение центра тяжести ма­шины

aj ,bj - длина и ширина следа (контакта) і опоры движителя с грунтом 5j - буксование і опоры движителя В - колея (поперечная база) машины

Bj, Li - поперечное и продольное расстояние от центра тяжести машины до геометрического центра пятна контакта і опоры движителя Bt, Lt - база и колея тягача Вр, Lp - база и колея прицепа

є - угловое ускорение корпуса машины (тракторного агрегата)

£,-П - текущие координаты точки контакта движителя с грунтом X, А. - коэффициенты, характеризующие закон взаимодействия движите­ля с грунтом

1. - угловая скорость поворота корпуса машины (тракторного агрегата)

фі - суммарная угловая скорость поворота (скольжения) і опоры движи­теля

ш,- - угловая скорость поворота і опоры движителя относительно корпуса машины

Yi - угол поворота і опоры движителя (прицепа) относительно корпуса тракторного агрегата (трактора)

фтах - максимальное значение удельной силы в контакте (коэффициент сцепления)

Фх - поперечная удельная силы в контакте движителя с грунтом

Фу - продольная удельная силы в контакте движителя с грунтом Фд - удельная сила, соответствующая полному скольжению F® Ме - внешняя сила и внешний момент в горизонтальной плоскости, при­веденные к центру тяжести машины Ft - площадь пятна контакта і опоры движителя

fi - коэффициент сопротивления самопередвижению і опоры движителя Ьцт- высота центра тяжести тракторного агрегата **Ga** - вес тракторного агрегата

J - момент инерции машины относительно вертикальной центральной оси

к - отношение скоростей различных колес, бортов, ведущих мостов, за­данное трансмиссией

к5 - скольжение в точке контакта і опоры движителя

ks - коэффициент деформации

L - база (продольная) машины

|! - коэффициент сопротивления повороту

m - масса машины

Мс - момент сопротивления повороту

Мі - момент трения в плоскости контакта і опоры движителя с грунтом

Nd - динамическая нормальная нагрузка на і опору движителя

Nj - суммарная нормальная нагрузка на і опору движителя

NCT - статическая нормальная нагрузка на і опору движителя

q - нормальное давление в точке контакта движителя с грунтом

И - динамический радиус і колеса

Ri - расстояние от центра поворота до мгновенного центра і опоры дви­жителя

Рцб - центробежная (нормальная) сила инерции

рцт- радиус кривизны траектории центра тяжести машины

S - перемещение точек грунта (деформация)

Тхі - поперечная составляющая силы в контакте і опоры движителя с грунтом

TYi - продольная составляющая силы в контакте і опоры движителя с грунтом

Vxi - поперечная скорость центра тяжести машины (перпендикулярно продольной оси машины)

Vyi - продольная скорость центра тяжести машины (вдоль продольной оси машины)

V5| -скорость буксования і опоры движителя по грунту

VTi - теоретическая скорость в контакте і опоры движителя с грунтом

х0, Уо — координаты центра поворота машины

хсГ- поперечная координата мгновенного центра скольжения площадки контакта і опоры движителя в общей системе координат машины Хі - поперечная координата мгновенного центра скольжения площадки контакта і опоры движителя в местной системе, связанной с і опорой Хцт, уцт - координаты центра тяжести машины в неподвижной системе ко­ординат

Усі - продольная координата мгновенного центра скольжения площадки контакта і опоры движителя в общей системе координат машины Уі - продольная координата мгновенного центра скольжения площадки контакта і опоры движителя в местной системе, связанной с і опорой W - суммарная мощность в контакте на повороте Wf - мощность самопередвижения Wtp - мощность трения скольжение

**ВВЕДЕНИЕ**

Актуальность темы. При конструировании различных машин все большее распространение приобретает процесс моделирования, по­зволяющий сократить, а порой и полностью исключить, различные ви­ды натурных испытаний. В рабочем цикле любой транспортной или тя­говой машины присутствует криволинейное движение (поворот), ха­рактеристики которого часто являются определяющими при проекти­ровании новых или оценке уже существующих образцов техники. По­этому исследованием этого вида движения занимаются многие отече­ственные и зарубежные ученые.

В настоящее время существует множество моделей поворота, большинство которых разрабатывались для быстроходных колесных (автомобили) и гусеничных (танки и боевые машины пехоты) машин. Однако, применение этих моделей к тракторным агрегатам не всегда оправдано, в силу особенностей их технологического цикла. Под трак­торным агрегатом понимается совокупность базовой машины (тракто­ра) с навесным или прицепным рабочим оборудованием, предназна­ченным для выполнения сельскохозяйственных, строительных, подъ­емно-транспортных и других видов работ. Специфика работы трактор­ных агрегатов порой ставит дополнительные задачи при исследова­нии криволинейного движения, не все из которых решены на сегодня.

1. Теория поворота развивалась в основном как теория активного движения (под управляющим воздействием со стороны водителя), в то

t

время как у некоторых тракторных агрегатов в процессе технологиче­ского цикла наблюдается пассивный поворот (криволинейное движе­ние без управляющего воздействия со стороны водителя). Примерами служат сдвиг бульдозерного агрегата при разработке грунта краем от­вала; складывание шарнирно-сочлененного фронтального погрузчика на месте; увод сельскохозяйственного трактора под действием вне- центренной крюковой нагрузки и т.д. Отдельные задачи (увод[[2]](#footnote-2)) реше­ны на основе специальных моделей, а другие (страгивание[[3]](#footnote-3)) не имеют решения вовсе.

1. Существующие модели поворота колесных и гусеничных машин основаны на различных методологических подходах при описании взаимодействия движителя с грунтом. Вместе с тем, некоторые трак­торные агрегаты используют комбинированный (колесно-гусеничный) движитель (харвестеры, лесные машины, тракторные поезда с гусе­ничным тягачом и колесными прицепами и др.). Применение нетради­ционных движителей (резиновая гусеница, железный валец виброкат­ка, жесткие колеса компактора с большими грунтозацепами) приводят к исчезновению границы между колесным и гусеничным движителем. Общая природа возникновения сил в контакте предполагает возмож­ность единого подхода к описанию их силового взаимодействия с грунтом.

Тракторные агрегаты используются в широком диапазоне грунто­вых условий: от твердых покрытий до рыхлых почв.

1. Тракторные агрегаты характеризуются разнообразием внешних, часто консольно приложенных нагрузок, выходящих за пределы опор­ной поверхности тракторного агрегата:
* сдвигающая в плане тяговая и поперечная (пахотный агрегат, рыхлитель, тягач, бульдозер);
* вертикальная (виброкаток, компактор, погрузчик, путепереуклад- чик, стогометатель, трубоукладчик).

Консольные нагрузки приводят к перераспределению реакций на опоры движителя. Это проявляется в изменении эпюр давления в кон­такте движителя с грунтом, динамических радиусов колес, и, как след-

ствие, к возникновению кинематических несоответствий и циркуляций мощности.

1. Тракторные агрегаты отличаются разнообразием конструктивных схем и систем управления, которые накладывают на характеристики криволинейного движения определенные ограничения, проявляющиеся в виде наложенных кинематических и геометрических связей.
2. Большие внешние нагрузки, действующие на тракторный агре­гат, и малые радиусы поворота вызывают значительные скольжения движителя по грунту. Это не позволяет при описании силового взаи­модействия записать в явном виде возникающие в контакте реакции, без учета упомянутых связей. Потому, используемый ранее при моде­лировании подход описания криволинейного движения под действием известных реакций со стороны грунта или по заданной траектории не может быть применим к тракторным агрегатам.

Таким образом, возникает противоречие между требованиями, предъявляемыми тракторными агрегатами к исследованию поворота и ограниченностью существующих моделей криволинейного движения, в силу принятых при построении гипотез и допущений, что составляет научную проблему.

В свете новых требований к моделям поворота, необходимо обос­нование используемых в их основе допущений, проверка применяе­мых методов построения, уточнение поставленных задач и д.р., дру­гими словами необходимо рассмотрение вопросов методологии при моделировании криволинейного движении тракторных агрегатов. В основе методологии лежит отказ от концепции машины, движущейся по заданной траектории или под действием заданных сил (реакций , связи).

Идея подхода заключается в рассмотрении тракторного агрегата, как управляемого объекта, криволинейное движение которого опреде­ляется наложенными на него связями, обеспечиваемыми конструкци-

**Введение -**

ей и системой управления, и взаимодействующего с грунтом посред­ством плоских площадок, составляющих с ним пары с переменными коэффициентами трения.

Объект исследования - процесс криволинейного движения ко­лесного или гусеничного тракторного агрегата с произвольным числом опор движителя, конструктивными параметрами, схемой управления поворотом, режимом движения и нагружения.

Предмет исследования - общие принципы и методы моделиро­вания криволинейного движения произвольного тракторного агрегата с учетом особенностей его рабочего цикла.

Методологической основой работы являются: системный под­ход, математическое моделирование, законы теоретической механи­ки, математическая теория трения, теория тракторов и автомобилей, информационные технологии и методы вычислительной математики.

Цель работы - выработка методологических подходов и принци­пов моделирования криволинейного движения произвольного много­опорного тракторного агрегата с учетом его типа движителя, системы управления, конструктивной схемы, параметров, режимов движения и нагружения.

Научная новизна, выносимая на защиту.

1. Описание силового взаимодействия с грунтом на повороте по­средством плоских площадок с переменным коэффициентом трения (сцепления), зависящим от радиуса движения опоры и координат мгновенного центра скольжения[[4]](#footnote-4) и учитывающим упругие свойства в контакте, отличающееся *общим подходом к колесному и гусеничному движителю.*
2. *Теоремы ортогональности,* устанавливающие связи между цен­тром поворота машины и мгновенными центрами скольжения опорных

площадок произвольно расположенных опор движителя при управ­ляемом и неуправляемом их движении относительно корпуса.

1. Новые уравнения, отражающие параметры, конструктивную схему тракторного агрегата, схему управления и режим движения каждой опоры движителя в виде *кинематических и геометрических связей*, накладываемых на параметры криволинейного движения.
2. Обобщенная модель нестационарного криволинейного движения произвольного многоопорного (колесного или гусеничного) тракторно­го агрегата, как управляемого объекта с наложенными на него связями между фазовыми координатами (координаты и скорости центра масс, угол поворота и угловая скорость относительно вертикальной оси, *ко­ординаты мгновенного центра скольжения опор движителя*) и управляющими параметрами (теоретические скорости опор движите­ля, их углы установки и угловые скорости в пространстве корпуса).
3. Методика составления частных моделей поворота (для различных конструктивных схем, структурных состояний и схем управления) для любого режима движения тракторного агрегата (стационарного, стати­ческого, квазистатического) *путем преобразования обобщенной мо­дели,* позволяющая более полно учесть особенности технологического цикла.
4. Методика составления *моделей страгивания*: активного и пас­сивного, динамического и статического, из состояния покоя и прямо­линейного движения (увод), с общих позиций, как частных случаев криволинейного движения.

Практическую ценность составляют методики и программы рас­чета криволинейного движения, позволяющие на стадии проектирова­ния производить выбор конструктивных схем, систем управления и

*1*

параметров тракторного агрегата с учетом области применения и тех­нологического цикла.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

подтверждается: методологической базой исследования; соблюдени­ем принципов механики, математического моделирования и статисти­ки; адекватностью моделей, проверенных посредством независимых и авторских натурных экспериментов; эксплуатационными испытаниями опытных образцов тракторных агрегатов, с внедренными по результа­там диссертационного исследования мероприятиями.

Реализация и внедрение результатов работы. Методика расче­та характеристик поворота применена в специализированном конструк­торском бюро по дорожным и строительным машинам ООО «ЧТЗ - Уралтрак» при проектировании опытных образцов тракторных агрегатов: малогабаритный погрузчик Т-02.03, поезд на базе малогабаритного трактора Т-02 с двумя прицепными вагонами, виброкаток ВК-24, компак­тор БКК-1, гусеничный экскаватор ЭО-112, сочлененный колесный по­грузчик ПК-5, путепереукладчик, колесный экскаватор-погрузчик.

Рекомендации, выданные по результатам диссертационной рабо­ты, использованы при модернизации серийных тракторных агрегатов, выпускаемых ООО «ЧТЗ - Уралтрак» гусеничных бульдозерно - рых- лительных агрегатов кл. 10-25 и трубоукладчиков на их базе.

Апробация результатов работы. Основные результаты исследо­ваний докладывались и обсуждались на Всесоюзных, республиканских и международных научно-технических конференциях:

* «Достижения науки - агропромышленному производству» (г. Челя­бинск, ЧГАУ, 2000-2010гг.);
* «Наука в ЮУрГУ», секция технических наук (г. Челябинск, ЮУрГУ, 2001 г, 2007-2011гг.);
* «Механика и процессы управления моторно-трансмиссионных систем транспортных машин» (г. Курган, КГУ, 2003г);
* «Актуальные проблемы автомобильного, железнодорожного, тру­бопроводного транспорта в Уральском регионе» (г. Пермь, ПГТУ, 2005г.);
* «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров», секция автомобилей, тракторов, их агрегатов и систем (г. Москва, МАМИ, 2009-201 Огг);
* «Механика и процессы управления», (г. Екатеринбург, УрО РАН, 2008г.).
* на научно техническом совете конструкторской секции Челябинского тракторного завода (2002г, 2009г, 2011г.);
* научных семинарах кафедр «ЭМТП» и «ТМ и ТММ» ЧГАУ (г. Челя­бинск, 2002г), «ТиА» ЧГАУ, «Автомобили» и «КГМ» ЮУрГУ (г. Челябинск, 2008-2009гг), «СМ-10» МГТУ им. Баумана (г. Москва, 2009г), «КГМ» МГТУ МАМИ (г. Москва, 201 Ог).

Публикации по работе. По материалам диссертационных иссле­дований опубликованы: 1 монография и 38 научных статей, из них 17 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа со­стоит из введения, 7 глав, общих выводов, списка литературы (244 наименований) и 10 приложений. Общий объем диссертации состав­ляет 296 страниц основного текста, 139 рисунков и 7 таблиц.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ выполнен обзор тракторных агрегатов и их классификация; анализ существующих подходов к построению моде­лей криволинейного движения и определены их области применения; выявлены основные гипотезы (допущения), принимаемые при по­строении моделей и соответствующие им ограничения; сформулиро­ваны научная проблема, цель и задачи исследования.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ на основе теоретических и эксперименталь­ных исследований выработан подход к формированию силовых фак­торов в контакте движителя с грунтом на повороте.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ исследуется кинематика криволинейного дви­жения системы грунт - движитель - машина, доказаны теоремы орто­гональности для управляемого и неуправляемого видов движения, со-

ставлены уравнения возникающих на повороте кинематических и гео­метрических связей.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА посвящена составлению обобщенной модели управляемого криволинейного движения произвольного многоопорно­го тракторного агрегата и разработке методики построения частных моделей.

ПЯТАЯ ГЛАВА посвящена экспериментальной проверке основных теоретических положений на примере стационарного поворота что по­зволило исключить влияние различных случайных факторов, на при­мере различных тракторных агрегатов (гусеничный трактор, погрузчик с управляемыми колесами, тракторный поезд с двумя прицепами и шарнирно - сочлененный погрузчик).

В ШЕСТОЙ ГЛАВЕ приведены примеры решения наиболее часто встречающихся задач активного поворота на примерах[[5]](#footnote-5) отдельных ТА (экскаватор, тракторный поезд, погрузчик, гусеничный трактор, путе- переукладчик и др.), выработаны практические рекомендации, вне­дренные в конструкциях машин.

СЕДЬМАЯ ГЛАВА посвящена исследованию страгивания. Состав­лены математические модели динамического и статического страгива­ния из состояния покоя и прямолинейного движения, выполнена экспе­риментальная проверка моделей пассивного страгивания, приведены примеры практического применения и выработаны конкретные рекомен­дации, внедренные в конструкциях тракторных агрегатов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На сегодняшний день теория поворота насчитывает множество различных моделей движения, большинство из которых разрабатыва­лись для быстроходных мобильных машин. Вместе с тем ТА обладают рядом *специфических качеств, не всегда учитываемых в этих мо­делях поворота:*
* в технологическом цикле многих ТА встречается криволинейное движение под действием внешних сил без управляющего воздействия со стороны водителя (страгивание, увод), вместе с тем в теории пово­рота мобильных машин мало проработаны вопросы моделирования пассивного поворота;
* разные методологические подходы в описании взаимодействия колесного и гусеничного движителя с грунтом затрудняют возможности описания криволинейного движения ТА с комбинированным (колесным и гусеничным) движителем;
* большие консольные вертикальные нагрузки приводят к пере­распределению реакций на опорах движителя, что в силу радиальной упругости шин приводит к возникновению кинематических несоответ­ствий и циркуляции мощности, мало исследованной повороте;
* движение ТА происходит в широком диапазоне грунтовых усло­вий (от твердых поверхностей до рыхлых почв) и на повороте сопрово­ждается значительным скольжением движителя по грунту, вызывае­мым малыми радиусами поворота и большими сдвигающими нагрузка­ми. Модели поворота быстроходных машин не могут быть распростра­нены на ТА, в силу гипотез и допущений, принимаемых при описании силового взаимодействия движителя с грунтом. На повороте ТА, при скольжении движителя по грунту, значение результирующей силы, за счет момента трения, всегда меньше предельного по сцеплению зна­чения, что делает реакцию со стороны грунта неизвестной и не позво­ляет записать ее в явном виде;

- разнообразие конструктивных схем и систем управления накла­дывают на характеристики криволинейного движения определенные ограничения, не всегда учитываемые при моделировании криволи­нейного движения по заданной траектории или под действием извест­ных внешних сил (реакций связи).

1. *Выработан единый подход* к описанию поворота (активного и пассивного) произвольного ТА (с колесным, гусеничным или комбини­рованным движителем), как объекта с наложенными связями, отра­жающими конструктивную схему, систему управления и режим нагру­жения. Взаимодействие движителя с грунтом осуществляется посред- - ством плоских площадок с переменным коэффициентом трения (сцеп­ления), годограф которого в каждой точке контакта зависит от радиуса движения опоры и координат ее МЦС.
2. *Описание силового взаимодействия* каждой опоры движителя с грунтом представлено на основе плоского скольжения с трением, где силовые факторы *(Тх,Ту,М)* в контакте являются функциями координат

(;с,**7**) МЦС с переменным анизотропным коэффициентом трения *{(рх,<ру),* зависящим от скольжения *(ks)* в точке. Предлагаемый подход к

формированию силовых факторов позволяет учесть различные эпюры нормального давления, форму и размеры пятна контакта, а также вы­делить в контакте зоны скольжения и сцепления с грунтом.

1. *Доказанные теоремы ортогональности* для управляемого и не­управляемого поворота, устанавливают связь между координатами МЦС произвольно расположенной опоры движителя и центром поворота ма­шины и позволяют составить недостающие *уравнения связей.* Сочета­ние различных уравнений геометрических (отражающих конструктивную схему и параметры машины) и кинематических (отражающих систему управления) связей позволяет описать все виды ограничений, наклады­ваемых на произвольный ТА в процессе криволинейного движения.
2. *Обобщенная модель* нестационарного управляемого поворота произвольного многоопорного ТА составлена в виде системы 3 диффе­ренциальных уравнений движения ТА и *2пт (пт -* число опор движите­ля ТА) уравнений связей между фазовыми координатами (координаты и скорости центра масс, угол поворота и угловая скорость относительно вертикальной оси, координаты МЦС опор движителя) и управляющими параметрами (теоретические скорости опор движителя, их углы установ­ки и угловые скорости в пространстве корпуса). Разработана *вычисли­тельная процедура* решения системы уравнений обобщённой модели, основанная на преобразованиях уравнений связей позволяющих свести задачу к решению дифференциальных уравнений. Начальные условия движения находятся из решения уравнений страгивания.
3. Разработана *методика составления частных моделей* поворота путем преобразования обобщённой модели для различных режимов движения (поворот стационарный, статический, квазистатический), кон­структивных схем (с управляемыми колесами, неповоротными опорами или шарнирно-сочлененной рамой), схем управления (тормозные и ве­домые колеса, ведущие с дифференциалом и индивидуальным приво­дом, и др.) и структурных состояний (наличие шарнирных звеньев, обла­дающих свободным относительным движением). В результате совмест­ного решения силовой и кинематической задачи поворота, находятся все выходные параметры криволинейного движения: траектория, тяго­вые усилия, радиус поворота, буксование каждой опоры, мощность тре­ния, центробежная сила, действительные скорости и др.
4. *Экспериментальная проверка* основных теоретических положе­ний проведена натурными полевыми испытаниями на примерах криво­линейного движения следующих ТА: гусеничного трактора, малогаба­ритный погрузчика с управляемыми передними колесами, тракторного поезда с двумя одноосными ведомыми прицепами и фронтального по­грузчика с шарнирно-сочлененной рамой на различных типах грунтов и режимах нагружения. Адекватность частных моделей осуществлялась по силовым и кинематическим параметрам движения, статистические характеристики, оценивающие отклонения расчётных и эксперимен­тальных величин нигде не вы ходили за границы 95% уровня довери­тельной вероятности.
5. На примерах отдельных ТА решены наиболее часто встречаю­щиеся *задачи активного и пассивного поворота,* выработаны реко­мендации, внедренные в производство:
* расчет минимального радиуса поворота, оценка ограниченного пространства для маневрирования (тракторный поезд с двумя прице­пами). *Опытный образец;*
* расчет максимальных тяговых усилий, выработка требований к моторно-трансмиссионной установке (гусеничный экскаватор ЭО- 112). *Опытный образец;*
* выбор рациональной схемы управления из условий устойчиво­го криволинейного движения (экскаватор-погрузчик). *Конструктор­ская документация;*
* сравнение конструктивных схем, выбор рациональной области применения (малогабаритный трактор Т-0.2). *Серийное и опытное производство;*
* расчет и снижение мощности трения на повороте (колесный фронтальный погрузчик с шарнирно-сочлененной рамой ПК-5). *Опыт­ный образец;*
* расчет максимальных динамических нагрузок в момент актив­ного страгивания (гусеничный путепереукладчик). *Опытный образец;*
* расчет максимальных нагрузок на толкающие брусья и гусе­ничные звенья при решении задачи предельного сдвига (БРА кл.10- 15, трубоукладчики TP-20, ТР-12). *Серийное производство,*

- выбор силовых гидроцилиндров складывания (компактор БКК- 1, виброкаток ВК-24, фронтальный погрузчик ПК-5). *Серийное и опыт­ное производство.*

Приведена классификация (по начальным условиям, причине и характеру движения) *задач страгивания,* разработана методика их решения, как частных моделей (активного и пассивного) криволиней­ного движения. Экспериментально подтверждена адекватность моде­лей предельного сдвига и модели увода с максимальной погрешно­стью 5 < 7,7%.

1. Обозначения не касаются первой главы, где сохраняется терминология и обозначения авторов, исследования которых освещаются.

 [↑](#footnote-ref-1)
2. Отклонение от прямолинейного движения под действием внешних сил. [↑](#footnote-ref-2)
3. Страгивание — начальный момент входа в поворот с места или из прямолинейного дви­жения, характеризуется отсутствием угловой скорости со=0. [↑](#footnote-ref-3)
4. Единственная точка в контакте опоры движителя с грунтом, где отсутствует скольжение.

 [↑](#footnote-ref-4)
5. Задачи взяты из практической деятельности автора в инженерно - конструкторской рабо­те на Челябинском тракторном заводе. [↑](#footnote-ref-5)