

УДК 629.33

Экспериментальное исследование эффективности стабилизации движения трактора при работе на склоне в режиме вспашки на масштабных моделях*

М.М. Жилейкин¹, Е.В. Ягубова¹, Д.А. Чижов²¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1² ФГУП «ЦАГИ», 105005, Москва, Российская Федерация, Радио ул., д. 17

An experimental study of tractor stabilization efficiency on scale models working on slopes in the plowing mode

M.M. Zhileykin¹, E.V. Yagubova¹, D.A. Chizhov²¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1² Central Aerodynamic Institute TsAGI, 105005, Moscow, Russian Federation, Radio St., Bldg. 17

e-mail: jileykin_m@mail.ru, yagubova.evg@yandex.ru, tankist_83@mail.ru



Задачи разработки и внедрения систем динамической стабилизации курсовой и траекторной устойчивости колесного трактора на склоне являются весьма актуальными, поскольку при движении, а также выполнении рабочих операций на участках склонов происходит снижение продольной и поперечной устойчивости машинно-тракторного агрегата, ухудшение его маневренности и управляемости, отклонение от требуемой траектории движения. При проектировании новых моделей транспортных средств часто требуется проверка тех или иных технических решений не только методами имитационного моделирования, но и на реальных образцах. Однако проведение натуральных испытаний опытных образцов осложняется очень большими затратами времени и материальных ресурсов. Решить данную проблему можно проводя исследования на масштабных моделях проектируемого транспортного средства, но при этом необходимо очень точно воспроизвести условия движения реального объекта. Приведено описание методики экспериментальной отработки алгоритмов работы системы динамической стабилизации колесного трактора. При заездах макета на поперечном грунтовом склоне на экспериментальном стенде замерялось отклонение его реальной траектории движения от идеальной. Заезды проводились с подруливанием и без подруливания. Сравнение полученных результатов показало эффективность предложенных алгоритмов динамической стабилизации.

Ключевые слова: колесный трактор, траектория движения, склон, динамическая стабилизация, подруливание, масштабная модель, экспериментальный стенд.



When a tractor unit is moving or performing work operations on slopes, its longitudinal and lateral stability decreases. It becomes less maneuverable and controllable and may deviate from a desired trajectory. Therefore, design and implementation of dynamic stabilization systems improving the wheel tractor's longitudinal and lateral stability becomes a highly relevant task. When designing new vehicles, it is often needed to test certain technical solutions not only by simulation but also by prototyping. However, prototype field tests are

* Работа выполнена в рамках договора № 9905/17/07/-к-12 между ОАО «КамАЗ» и МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Российской Федерации и Минобрнауки.

complicated by being expensive in time and material resources. This problem can be solved by conducting experiments on scaled models as long as the movements of the real object are very accurately reproduced. The paper describes the methodology of experimental development of the algorithms for the dynamic stabilization system of a wheel tractor unit. The scaled model was test run on lateral sloped unpaved ground on a test stand, and deviation of the actual trajectory from the ideal one was measured. The tests were conducted with steering and without. Comparison of the results showed the effectiveness of the proposed algorithms of dynamic stabilization.

Keywords: wheeled tractor, trajectory, slope, dynamic stabilization, algorithms, steer, scale models, test stand.

При движении колесного трактора в поперечном направлении склона происходит перераспределение нормальной нагрузки по бортам. При недостаточном сцеплении колес с опорной поверхностью трактор сползает вниз по склону и реальная траектория его движения отклоняется от требуемой.

Известны различные способы, направленные на борьбу со сползанием трактора вниз по склону. Некоторые из них требуют внесения серьезных изменений в конструкцию тракторов, другие реализуются в полевых условиях путем установки дополнительных вспомогательных устройств.

Среди основных способов, уменьшающих отклонение трактора от требуемой траектории движения, можно выделить следующие:

- использование системы стабилизации остова трактора;
- понижение высоты расположения центра тяжести или увеличение колеи с установкой колес меньшего диаметра;
- установка сдвоенных колес;
- использование съемных уширительных ободьев, так называемых дополнительных решетчатых колес;
- установка противовеса, перемещающегося по штанге вверх по склону;
- использование почвенных рулей, закрепленных на остова и заглубляемых в почву.

Подробное описание этих способов повышения устойчивости тракторов на склонах дано в работах [1–4]. Все перечисленные способы требуют либо внесения серьезных изменений в конструкцию тракторов, что приводит к их удорожанию, либо характеризуются низкой эффективностью. Они позволяют уменьшить вероятность опрокидывания колесного трактора при работе на склоне, но неэффективны с точки зрения повышения устойчивости движения трактора [5].

Повысить устойчивость движения трактора можно с помощью системы динамической стабилизации (СДС), например, управляя распре-

делением крутящих моментов по ведущим колесам транспортного средства. Также повышения устойчивости движения трактора вдоль горизонтали склона можно добиться, скомпенсировав боковой увод колес трактора. Это можно реализовать, подвернув управляемые колеса вверх по склону на величину угла увода. Причем возможен поворот как колес только одной оси, так и всех управляемых колес [6]. В статье описана экспериментальная проверка данного способа повышения устойчивости движения трактора на склоне. Отработка алгоритмов подруливания проведена экспериментальными методами на масштабной модели. Использование макета колесного трактора в экспериментах позволяет избежать больших материальных затрат на создание опытного образца транспортного средства.

Цель работы — экспериментальное определение эффективности подруливания при движении транспортного средства на деформируемом склоне.

Алгоритмы динамической стабилизации трактора на склоне за счет корректирующего изменения угла поворота управляемых колес (подруливания). В соответствии со сказанным выше, увеличить устойчивость движения трактора на склоне с различной эффективностью можно несколькими способами: перераспределением крутящих моментов по ведущим колесам трактора, подруливанием управляемыми колесами или совместным воздействием на крутящие моменты и углы поворота управляемых колес.

Для экспериментальной проверки используем способ подруливания управляемыми колесами транспортного средства. При разработке системы курсовой и траекторной стабилизации движения трактора в процессе управления необходимо определить параметры, достоверно характеризующие свойство поворачиваемости в текущий момент времени: угловая скорость вращения агрегата относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс ω_z ; продоль-

ное a_x и боковое a_y ускорения центра масс; разность углов увода крайних осей ($\delta_2 - \delta_1$). Последний параметр в процессе движения изменить невозможно.

В качестве параметра, характеризующего степень поворачиваемости колесного трактора, предлагаем использовать угол $\beta = \theta_T - \theta_\Phi \neq 0$ между векторами линейных скоростей центра масс: теоретической V_T и фактической V_Φ (рис. 1).

Для обеспечения работы СДС необходимо определить текущую скорость колесного трактора. Скорость агрегата (V_x, V_y) находят путем интегрирования производных dV_x/dt и dV_y/dt , рассчитываемых по следующим формулам:

$$\frac{dV_x}{dt} = a_x + \omega_z V_y;$$

$$\frac{dV_y}{dt} = a_y - \omega_z V_x.$$

Затем определяют текущее значение тангенса угла между вектором скорости и продольной осью агрегата $\text{tg } \theta_\Phi$ (см. рис. 1), а также теоретическое значение тангенса этого угла $\text{tg } \theta_T$. Курсовая устойчивость трактора обеспечивается при равенстве этих углов, а, значит, и их тангенсов.

Значения $\text{tg } \theta_\Phi$ и $\text{tg } \theta_T$ вычисляют по формулам

$$\text{tg } \theta_\Phi = V_y/V_x;$$

$$\text{tg } \theta_T = \frac{L-a}{L} \text{tg } \theta_{1\text{ср}},$$

где V_x, V_y — проекции вектора скорости центра масс трактора на оси подвижной системы координат; L — база трактора; a — расстояние от центра масс трактора до передней оси; $\theta_{1\text{ср}}$ — средний угол поворота передних (левого и правого) управляемых колес.

Алгоритмы оценки составляющих вектора фактической скорости транспортного средства в настоящее время хорошо известны (см., например, [6]) и в данной работе не рассматриваются.

Факт заноса передней или задней осей колесного трактора устанавливается исходя из следующих условий:

- 1) если $\text{sign}(\theta_T - \theta_\Phi) \text{sign}(\theta_1) > 0$, система диагностирует наступление заноса передней оси;
- 2) если $\text{sign}(\theta_T - \theta_\Phi) \text{sign}(\theta_1) < 0$, система диагностирует наступление заноса задней оси.

Несовпадение углов направлений теоретического и фактического векторов скорости озна-

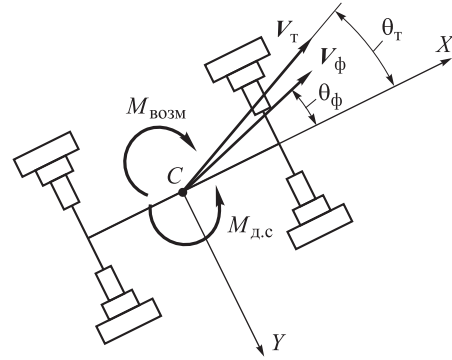


Рис. 1. Угол отклонения вектора скорости от продольной оси трактора

чает, что на трактор действует динамический возмущающий момент $M_{\text{возм}}$ (см. рис. 1), стремящийся «увести» его с заданной водителем траектории движения. Для компенсации этого возмущающего воздействия необходимо создать динамический стабилизирующий момент $M_{\text{д.с.}}$, который удержит колесный трактор на заданной траектории [7, 8].

Примем, что средний угол подруливания для управляемых колес передней оси $\theta_{1\text{ср. подр}} = \beta$. Тогда углы подруливания внешнего и внутреннего (по отношению к направлению поворота) управляемых колес определяют по формулам

$$\theta_{\text{вн. подр}} = L/(L/\beta - B/2);$$

$$\theta_{\text{внеш. подр}} = L/(L/\beta + B/2),$$

где B — колея трактора.

Для оценки эффективности работы СДС движения трактора используем специальные критерии эффективности, позволяющие оценить на сколько процентов каждый из рассматриваемых вариантов привода колес в сочетании с алгоритмом подруливания обеспечивает снижение отклонения реальной траектории движения от так называемой идеальной. Это можно охарактеризовать коэффициентом относительной эффективности:

$$O_{\text{эф}} = \left(1 - \frac{\text{СКО}_{Y_{\text{стаб}}}}{\text{СКО}_{Y_0}} \right) 100\%.$$

Здесь СКО_{Y_0} — среднее квадратическое отклонение от «идеальной» траектории при движении без стабилизирующего управления; $\text{СКО}_{Y_{\text{стаб}}}$ — среднее квадратическое отклонение от «идеальной» траектории при движении с использованием системы, создающей стабилизирующее воздействие на трактор.

Физический смысл коэффициента $O_{\text{эф}}$ заключается в следующем: он показывает, на сколько процентов снижается среднее квадратич-

ческое отклонение от «идеальной» траектории при движении с использованием системы, повышающей устойчивость движения агрегата по сравнению с движением без стабилизирующего управления.

Полноприводная радиоуправляемая модель колесного трактора. Объект исследования представляет собой масштабную модель трактора полной массой 8,4 кг с колесной формулой 4×4 (рис. 2).

Несущая система выполнена из алюминиевых пластин толщиной 2,5 мм. Подвеска колес передней и задней осей независимая, на поперечных рычагах. В качестве упругого элемента использована цилиндрическая стальная пружина с регулировкой поджатия, обеспечивающая изменение жесткости в случае возможного изменения статической нагрузки на колесо, а в качестве демпфирующих элементов системы подрессоривания — маслonaполненные амортизаторы.

На модель установлен бесколлекторный двигатель с электронным регулятором хода. Мотором управляет электронный регулятор скорости с возможностью настройки с помощью специального программатора, подключаемого к компьютеру. Крутящий момент от тягового электродвигателя передается на ведущие

колеса через цилиндрический редуктор. Межосевой дифференциал отсутствует. От цилиндрического редуктора момент с помощью валов поступает на межколесные дифференциалы, оснащенные системой дистанционной блокировки, и далее полуоси передают вращение на все четыре колеса модели (рис. 3).

Привод рулевого управления (рис. 4) осуществляется только на переднюю ось и включает в себя серводвигатель, систему тяг и рычагов, а также рулевую трапецию с механизмом регулировки угла схождения колес.

Колеса диаметром 0,186 м состоят из резиновых шин с развитым протектором на черных хромированных дисках. Отпечатки пятна контакта передней и задней шин представлены на рис. 5. Площадь отпечатков для переднего колеса составляет $12,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, а для заднего колеса — $11,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Цифровая система управления включает в себя цифровой пульт с органами управления тяговым и рулевым приводами, а также разъемы для подключения к компьютеру.

Характеристики масштабной модели:

- колесная база 0,345 м;
- колея 0,25 м;
- высота 0,254 м;
- максимальная скорость 70 км/ч;
- привод полный;

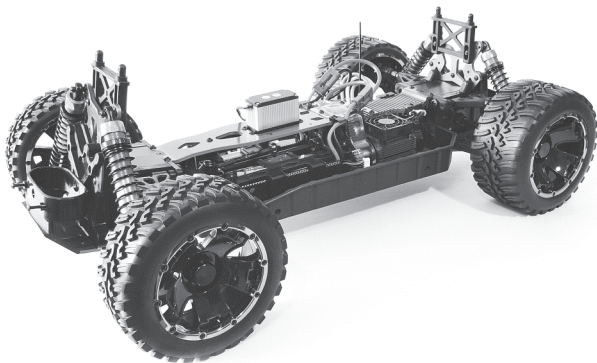


Рис. 2. Общий вид масштабной модели

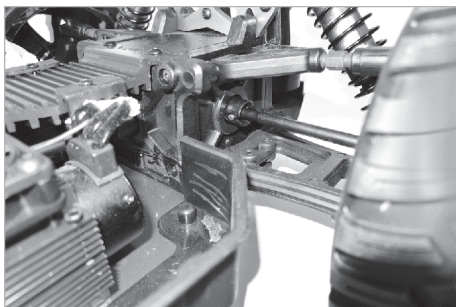


Рис. 3. Задний межколесный дифференциал и ведущая полуось

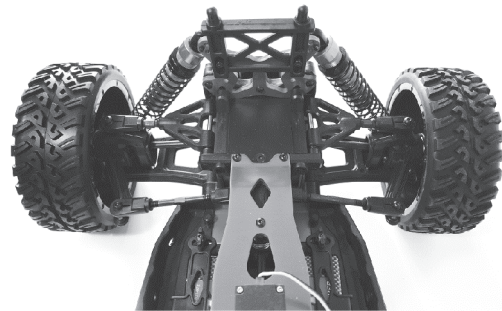


Рис. 4. Рулевая трапеция передней оси масштабной модели

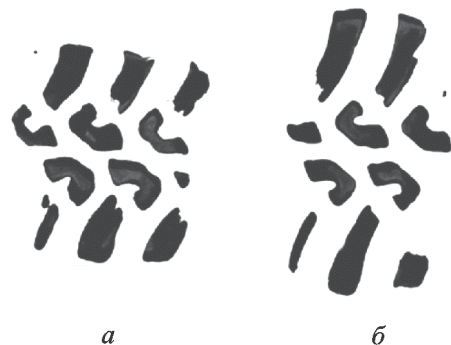


Рис. 5. Отпечаток пятна контакта шины масштабной модели: а — переднее колесо; б — заднее колесо

Таблица 1

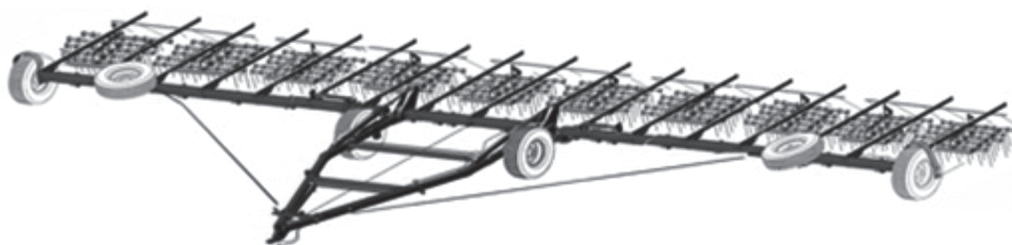
Параметры объекта и масштабной модели

Параметр	Объект	Модель
Линейный масштаб	1:1	1:8
Радиус колеса, м	0,6	0,075
Колесная база, м	2,7	0,3375
Колея, м	1,8	0,225
Площадь отпечатка шины на твердой поверхности при полной массе, м ²	0,14375	Переднее колесо $12,3 \cdot 10^{-4}$, заднее колесо $11,8 \cdot 10^{-4}$
Давление в пятне контакта шины на твердую опорную поверхность при номинальной нагрузке на колесо, кПа	160	23
Полная масса, кг	6 500	12,7
Скорость движения при вспашке, км/ч	10,0	3,54
Мощность двигателя, Вт	110 000	3,36
Угол склона опорной поверхности, град	10	10

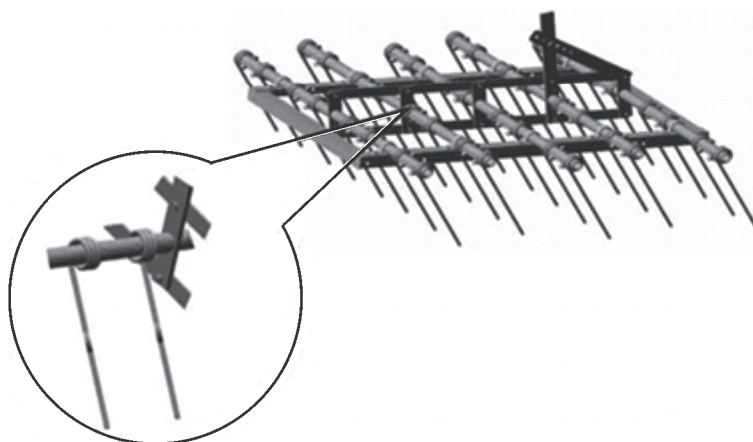
- полная масса 12,4 кг;
- масса, приходящаяся на колесо передней оси, 3,1 кг;
- масса, приходящаяся на колесо задней оси, 3,1 кг;
- диаметр колеса 0,156 м;
- ширина переднего колеса 0,06 м;
- ширина заднего колеса 0,06 м.

В качестве объекта принят универсально-пропашной трактор ЛТЗ-155. Параметры объекта и масштабной модели приведены в табл. 1.

Описание конструкции бороны. Базовой принята зубовая широкозахватная гидрофицированная борона БПШ-21, которая агрегируется с трактором-аналогом (рис. 6, а).



а



б

Рис. 6. Борона БПШ-21:
а — общий вид; б — одна секция

Рабочая ширина захвата базовой бороны составляет 21 100 мм. По всей ширине располагается 10 секций. Ширина одной секции $B = 21100/10 = 2110$ мм. С учетом пропорций макета получаем $B_m \approx 240$ мм, длина макета бороны $L_m = 7200/8,78 = 820$ мм. По рабочему чертежу был изготовлен макет бороны.

Борона с макетом трактора соединена посредством гибкой сцепки двумя цепями со звеньями средней толщины. Для предотвращения зарывания бороны в грунт использована ось с двумя колесами.

Эксперимент проводили на стенде «Грунтовой канал» кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана [9]. Методики проведения эксперимента и обработки полученных результатов приведены ниже.

Методика проведения эксперимента.

1. Подготовка грунта. Для обеспечения угла склона, равного 10° , был изготовлен жесткий шаблон, с помощью которого обеспечивался равномерный уклон песка в грунтовой канале (рис. 7). Выставлялись два флажка «старт»–«финиш», по которым устанавливался макет в первоначальное положение перед проведением заездов.

2. Установка макета и бороны в начальное положение по ориентирам. Проверялась ориентация продольной оси макета относительно флажков, а также правильность положения передних управляемых колес.

3. Проведение заездов: 15 — без подруливания и 15 — с подруливанием передними управляемыми колесами. Подруливание в данном эксперименте осуществлялось выставлением передних управляемых колес перед заездами на заранее рассчитанный угол, исходя из среднего

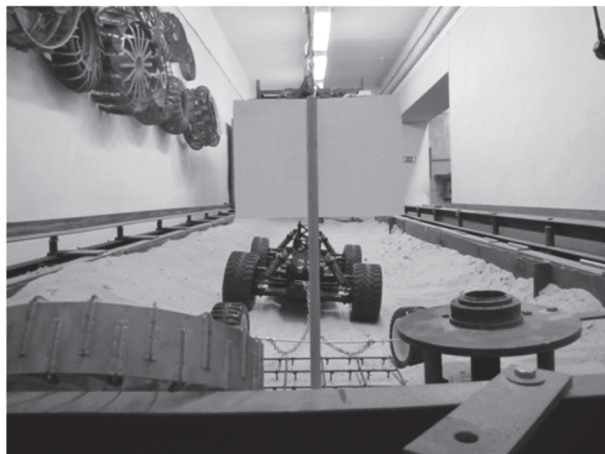


Рис. 7. Поперечный склон в грунтовой канале

угла отклонения оси макета от требуемой траектории при движении без подруливания. В ходе проведения эксперимента определялось расстояние между точками 1 и 8. Исходя из замеренных величин отклонений от требуемой траектории в данной точке x_{8i} , получаем значения углов для каждого из 15 замеров по зависимости

$$\beta_i = \arctg \frac{x_{8i}}{L_{\text{кан}}},$$

где $L_{\text{кан}}$ — длина грунтового канала на стенде.

Далее проверяется однородность выборки, а также распределение величин на нормальность. Установлено, что результаты подчиняются нормальному закону, а, следовательно, в качестве угла отклонения принимаем математическое ожидание

$$m(\beta) = \frac{1}{n} \sum_i x_i = 0,1057 \text{ рад.}$$

Определив угол отклонения продольной оси макета от требуемой траектории движения, найдем угол, на который необходимо повернуть управляемые колеса макета, чтобы скомпенсировать отклонение.

Для верхнего по склону колеса

$$\theta_v = \frac{L}{L/\beta + B/2}.$$

Здесь L — база макета, $L = 345$ мм; B — колея макета, $B = 250$ мм. Отсюда

$$\theta_v = 0,10179 \text{ рад} = 5,83^\circ.$$

4. Между флажками «старт»–«финиш» натягивалась проволока, по которой в определенных, заранее отмеченных точках, устанавливались зеленые флажки, обозначающие требуемую траекторию движения. Посередине колеи в соответствующих точках выставлялись красные флажки, обозначающие реальную траекторию.

5. Замер отклонения реальной траектории движения макета от требуемой в девяти точках. Результаты измерений заносились в протокол испытаний.

Замеры отклонений макета от идеальной траектории движения приведены на рис. 8. Видно, что при движении без подруливания (рис. 8, а) отклонение на много больше, чем при движении с подруливанием управляемых колес (рис. 8, б).

Методика обработки полученных результатов измерений. Результаты замеров отклонения от траектории движения трактора с бороной при наличии и отсутствии подруливания сведены в табл. 2.

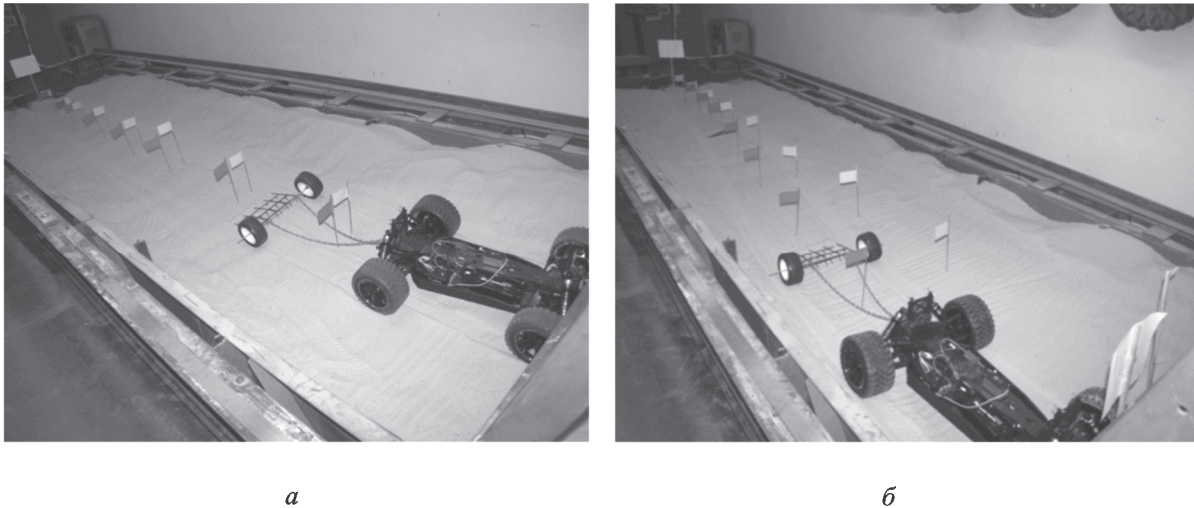


Рис. 8. Макет на финише заезда:
 а — при движении без подруливания; б — при движении с подруливанием

Результаты эксперимента обрабатывали с использованием известных статистических гипотез и критериев.

1. Отсев грубых погрешностей для исключения из дальнейшего анализа результатов замеров с большими отклонениями. Наилучшим с практической точки зрения является использование критерия Н.В. Смирнова, в котором генеральные параметры не известны, а даны лишь оценки математического ожидания и дисперсии на основании вариационного ряда. При этом предполагается нормальное распределение изучаемой случайной величины [10, 11].

2. Проверка соответствия эмпирической функции распределения теоретическому закону распределения. Воспользуемся критерием χ^2 -Пирсона для группированных наблюдений.

Разбив измеренные величины во всех точках на интервалы и определив все необходимые параметры, рассчитаем показатели χ^2 для всех точек. Сравним расчетные значения с табличным параметром для уровня значимости $q = 0,06$, вероятности $p = 0,95$ и степени свободы $k = 2$, $\chi_q^2 = 5,99$. Поскольку для всех расчетных параметров, как для режима без подруливания, так и с подруливанием, выполняется условие $\chi^2 < \chi_q^2$, принята гипотеза о том, что измеренные результаты подчиняются нормальному закону для всех расчетных точек.

3. Определение значения измеряемой величины. Поскольку установлено, что результаты наблюдений подчиняются нормальному закону, в качестве наилучшей оценки измеряемой величины принята оценка математического ожидания выборки [10, 11].

4. Определение показателя относительной эффективности рассматриваемого типа меха-

нического привода с подруливанием и без него. Как было показано выше, в качестве отклонения реальной траектории движения макета от требуемой в каждой точке замера принимаем оценку математического ожидания измерений в данной точке. Значения математических ожиданий отклонений в каждой расчетной точке для движения с подруливанием и без него приведены в табл. 3.

Среднеквадратическое отклонение реальной траектории движения от требуемой при движении без активизации стабилизирующего управления $СКО_{Y_0}$ и при движении, когда алгоритм подруливания активирован $СКО_{Y_{стаб}}$, можно определить по следующим формулам:

$$СКО_{Y_0} = \sqrt{\sum_i x_{0i}^2 / (n-1)};$$

$$СКО_{Y_{стаб}} = \sqrt{\sum_i x_i^2 / (n-1)},$$

где n — количество точек, $n = 9$. Отсюда получаем:

$$СКО_{Y_0} = 248,77 \text{ мм}; \quad СКО_{Y_{стаб}} = 66,74 \text{ мм}.$$

Окончательно необходимо оценить на сколько процентов применение дифференциального привода колес с заблокированными межосевыми и разблокированными межколесными дифференциалами на макете совместно с алгоритмом подруливания позволяет снизить отклонение реальной траектории движения от требуемой. Для этого используем коэффициент относительной эффективности, определенный для экспериментальных значений:

$$Q_{эф.э} = (1 - СКО_{Y_{стаб}} / СКО_{Y_0}) 100 \% = 73 \%.$$

Таблица 2

Результаты замеров отклонения от траектории движения, мм

Номер заезда	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Без подруливания</i>									
1	0	15	32	80	142	225	324	385	420
2	0	25	33	58	65	133	225	287	475
3	0	23	58	107	167	255	320	390	550
4	0	12	42	75	160	272	332	420	555
5	0	15	33	77	152	225	292	360	510
6	0	15	35	66	134	165	275	331	455
7	0	22	45	58	130	172	255	347	480
8	0	21	26	94	130	172	241	295	400
9	0	35	52	85	142	206	260	314	475
10	10	50	52	79	155	217	280	322	500
11	12	52	87	102	151	257	322	390	490
12	10	60	70	87	105	155	242	292	445
13	0	24	35	72	130	180	298	357	505
14	17	33	44	79	145	215	288	319	470
15	0	23	34	82	115	155	261	284	494
<i>С подруливанием</i>									
1	14	24	23	55	73	94	86	85	20
2	0	19	36	45	121	125	143	112	70
3	11	24	13	37	82	82	118	89	70
4	25	15	15	41	83	75	73	79	30
5	22	25	43	65	90	96	130	126	120
6	0	10	12	39	74	100	92	95	80
7	25	19	36	69	115	140	157	142	80
8	23	14	23	32	47	77	102	79	50
9	22	43	59	80	135	159	158	150	70
10	25	26	45	37	58	86	88	86	85
11	16	7	18	16	22	57	76	64	70
12	13	0	0	15	43	65	65	69	60
13	0	28	14	22	40	81	105	104	70
14	16	0	9	12	19	44	57	49	0
15	22	17	11	7	6	22	16	15	0

Таблица 3

Оценка математического ожидания измерений, мм

Движение	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Без подруливания ($m(x_{0i})$)	3,27	28,33	45,2	80,07	139,86	200,27	281	339,53	481,6
С подруливанием ($m(x_{1i})$)	15,6	18,07	23,8	38,13	67,2	86,87	97,7	89,6	58,33

По результатам математического моделирования колесного трактора с дифференциальной трансмиссией с заблокированным межосевым и разблокированными межколесными дифференциалами на склоне при активной системе подруливания рассчитывается коэффициент эффективности:

$$Q_{\text{эф. м}} = \left(1 - \frac{\text{СКО}_{Y_{\text{стаб}}}}{\text{СКО}_{Y_0}} \right) 100 \% =$$

$$= \left(1 - \frac{0,4681}{1,966} \right) 100 \% = 76,19 \%$$

Как следует из сравнения коэффициентов эффективности, полученные экспериментально значения близки к аналогичным параметрам, определенным в результате математического моделирования, что свидетельствует о хорошей сходимости результатов.

5. Определение доверительных интервалов. Важным при оценке параметров является построение интервала, который «накрывает» оцениваемый параметр с известной степенью достоверности. Для известных выборочных значений математического ожидания m и среднеквадратического отклонения S (СКО) доверительный интервал для оценки математического ожидания величины отклонения μ_x определяется следующей формулой [10, 11]:

$$m - \frac{St_n\alpha/2}{(n-1)^{0,5}} \leq \mu_x \leq m + \frac{St_n\alpha/2}{(n-1)^{0,5}}$$

Здесь $t_n\alpha/2$ — табличное значение распределения Стьюдента; α — доверительная вероятность, как правило принимают $\alpha = 0,9...0,95$ [10, 11].

Построим требуемую траекторию, полученную при движении без подруливания, а также с подруливанием с соответствующими доверительными интервалами (рис. 9). На рисунке видно, что при использовании алгоритмов подруливания отклонение траектории движения макета существенно меньше, чем при движении

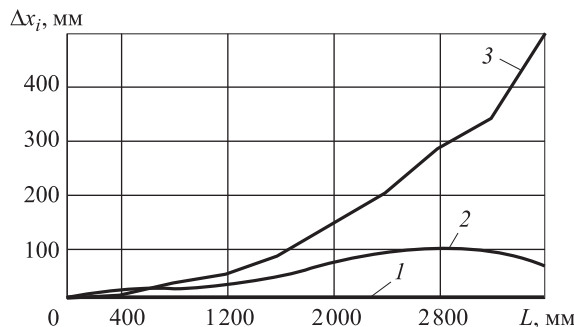


Рис. 9. Траектории движения макета при испытательных заездах:

1 — идеальная траектория; 2 — с подруливанием; 3 — без подруливания

без подруливания. Траектория движения без подруливания бесконечно отклоняется от требуемой, а при подруливании происходит постепенное выравнивание траектории движения. Все это подтверждает эффективность применения предлагаемых алгоритмов подруливания, а также доказывает целесообразность работы СДС движения транспортного средства.

Выводы

1. Разработаны алгоритмы работы системы динамической стабилизации движения транспортного средства.

2. Методами имитационного моделирования доказана эффективность предложенных алгоритмов, коэффициент эффективности составляет 76 %.

3. При экспериментальной проверке эффективности применения данных алгоритмов на масштабной модели колесного трактора при движении по грунту на склоне коэффициент эффективности составил 73 %.

4. Получена хорошая сходимость результатов моделирования и эксперимента, что доказывает состоятельность и эффективность разработанных алгоритмов стабилизации движения транспортного средства.

Литература

[1] Шарипов В.М., Апелинский Д.В., Арустамов Л.Х. *Тракторы. Конструкция*. Москва, Машиностроение, 2012. 790 с.

[2] Шипилевский Г.Б., Архипов В.С. Перспективы развития диагностики технического состояния тракторов на основе бортовых электронных средств. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*, 2004, № 7, с. 3–8.

[3] Мамити Г.И., Льянов М.С., Плиев С.Х., Салбиева З.С. Устойчивость колесного трактора в повороте. *Тракторы и сельхозмашины*, 2011, № 8, с. 18–21.

[4] Liebman M., Mohler Ch., Staver Ch. *Ecological management of agricultural weeds*. Cambridge University press, Cambridge, UK. 2004. 532 p.

- [5] Гольяпин В.Я. Современные тракторы зарубежных фирм. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*, 2004, № 5, с. 39–54.
- [6] Ryu J., Gerdes J.C. Estimation of vehicle roll and road bank angle. *Proceedings of the American Control Conference*, 2004, vol. 3, pp. 2110–2115.
- [7] Rodrigues A.O. *Evaluation of an active steering system*. Master's degree project. Sweden, 2004. URL: http://people.kth.se/~kallej/grad_students/rodriguez_orozco_thesis04.pdf (дата обращения 1 декабря 2014).
- [8] Mammari S., Baghdassarian V.B. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering. *Proceedings of the American Control Conference*, 2000, vol. 1, pp. 105–109.
- [9] Чижов Д.А., Горелов В.А., Котиев Г.О. Лабораторный расчетно-экспериментальный комплекс для исследования тягово-энергетических свойств колесных движителей. *Тракторы и сельхозмашины*, 2012, № 4, с. 21–27.
- [10] Орлов А.И. *Прикладная статистика*. Москва, Изд-во «Экзамен», 2006. 672 с.
- [11] Орлов А.И. *Вероятность и прикладная статистика: основные факты: справочник*. Москва, КНОРУС, 2010. 192 с.

References

- [1] Sharipov V.M., Apelinskii D.V., Arustamov L.Kh., Bezrukov B.B. *Traktory. Konstruktsiia* [Tractors. Design]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2012. 790 p.
- [2] Shipilevskii G.B., Arkhipov V.S. Perspektivy razvitiia diagnostiki tekhnicheskogo sostoiianiia traktorov na osnove bortovykh elektronnykh sredstv [Prospects for the development of diagnostics of technical condition of tractors on the basis of airborne electronic aids]. *Traktory i sel'skokhoziaistvennye mashiny* [Tractors and agricultural machinery]. 2004, no. 7, pp. 3–8.
- [3] Mamiti G.I., L'ianov M.S., Pliev S.Kh., Salbieva Z.S. Ustoichivost' kolesnogo traktora v povorote [Stability of wheel tractor on the turn]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery]. 2011, no. 8, pp. 18–21.
- [4] Liebman M., Mohler Ch., Staver Ch. *Ecological management of agricultural weeds*. Cambridge University press, Cambridge, UK. 2004. 532 p.
- [5] Gol'tiapin V.Ia. Sovremennye traktory zarubezhnykh firm [Modern tractors foreign firms]. *Traktory i sel'skokhoziaistvennye mashiny* [Tractors and agricultural machinery]. 2004, no. 5, pp. 39–54.
- [6] Ryu J., Gerdes J.C. Estimation of vehicle roll and road bank angle. *Proceedings of the American Control Conference*, 2004, vol. 3, pp. 2110–2115.
- [7] Rodrigues A.O. *Evaluation of an active steering system*. Master's degree project. Sweden, 2004. Available at: http://people.kth.se/~kallej/grad_students/rodriguez_orozco_thesis04.pdf (accessed 1 December 2014).
- [8] Mammari S., Baghdassarian V.B. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering. *Proceedings of the American Control Conference*, 2000, vol. 1, pp. 105–109.
- [9] Chizhov D.A., Gorelov V.A., Kotiev G.O. Laboratornyi raschetno-eksperimental'nyi kompleks dlia issledovaniia tiagovo-energeticheskikh svoistv kolesnykh dvizhitelei [Laboratory experiment-calculated complex for the investigation of traction and power properties of wheeled mover]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery]. 2012, no. 4, pp. 21–27.
- [10] Orlov A.I. *Prikladnaia statistika* [Applied Statistics]. Moscow, «Ekzamen» publ., 2006. 672 p.
- [11] Orlov A.I. *Veroiatnost' i prikladnaia statistika: osnovnye fakty: spravochnik* [Probability and Applied Statistics: Key Facts: A Guide]. Moscow, KNORUS publ., 2010. 192 p.

Информация об авторах

ЖИЛЕЙКИН Михаил Михайлович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: jileykin_m@mail.ru).

ЯГУБОВА Евгения Вячеславовна (Москва) — аспирант кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: yagubova.evg@yandex.ru).

ЧИЖОВ Дмитрий Александрович (Москва) — кандидат технических наук, инженер отдела № 2 НИО-12 ФГУП «ЦАГИ» (105005, Москва, Российская Федерация, Радио ул., д. 17, e-mail: tankist_83@mail.ru).

Information about the authors

ZHILEYKIN Mikhail Mikhailovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Wheel Vehicles. BMSTU (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: jileykin_m@mail.ru).

YAGUBOVA Yevgenia Vyacheslavovna (Moscow) — Post-graduate, Department of Wheel Vehicles. BMSTU (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: yagubova.evg@yandex.ru).

CHIZHOV Dmitry Alexandrovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Engineer, Department # 2, Scientific and Research Organization NIO-12, Central Aerodynamic Institute TsAGI (105005, Moscow, Russian Federation, Radio St., Bldg. 17, e-mail: tankist_83@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышел в свет учебник
Э.А. Гладкова, В.Н. Бродягина, Р.А. Перковского

«Автоматизация сварочных процессов»

Приведено описание основных элементов автоматизации сварочных установок. Даны принципы построения и примеры реализации современных систем управления оборудованием и процессами дуговой, контактной и электронно-лучевой сварки. Рассмотрены системы управления пространственным положением источника нагрева относительно линии стыка, автоматизированные комплексы с микроконтроллерами и ЭВМ для управления качеством сварного соединения, а также проблемы роботизации дуговой и контактной сварки.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru