

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач, А.А. Стадухин

**Теория подрессоривания
высокоподвижных двухзвенных
гусеничных машин**

Учебное пособие



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2023

УДК 629.3.027.3
ББК 39.336
К55

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://bmstu.press/catalog/item/7910/>

Факультет «Специальное машиностроение»
Кафедра «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия*

Рецензент
д-р техн. наук *М.М. Жилейкин*

Котиев, Г. О.
К55 Теория поддрессоривания высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин : учебное пособие / Г. О. Котиев, Е. Б. Сарач, А. А. Стадухин. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. — 196 с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5994-0

Рассмотрены вопросы теории поддрессоривания транспортных гусеничных машин: критерии плавности хода, прогнозирование быстроходности при ограничении по системе поддрессоривания, математическое моделирование движения гусеничной машины по неровностям местности и моделирование дорожно-грунтовых условий, синтез многоуровневых систем поддрессоривания и выбор их характеристик, управляемые системы поддрессоривания гусеничных и колесных машин, а также вопросы управления углом складывания секций двухзвенной гусеничной машины в целях повышения быстроходности. Представлены перспективы развития систем поддрессоривания.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Транспортные средства специального назначения» и «Наземные транспортно-технологические средства».

УДК 629.3.027.3
ББК 39.336



Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте: info@bmstu.press

ISBN 978-5-7038-5994-0

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Предисловие

В пособии представлены основные положения теории поддрессирования транспортных гусеничных машин в соответствии с дисциплинами «Теория систем поддрессирования военных гусеничных машин» для специальности 23.05.02 «Транспортные средства специального назначения» и «Виброакустическая безопасность автомобиля и трактора» для специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», содержащими по три модуля, последовательно изучаемых в течение одного семестра.

Цель издания — изложение теоретических разделов указанных дисциплин для подготовки специалистов к теоретическим исследованиям в области системы поддрессирования многоцелевых гусеничных машин и мобильных робототехнических комплексов и к участию в создании системы поддрессирования перспективных гусеничных машин.

Структурно пособие представлено введением, главами 1–7. Главы 1, 2 соответствуют разделу 3, глава 6 — разделу 2 модуля 1 курса «Теория систем поддрессирования военных гусеничных машин»; глава 3 — разделу 1, глава 7 — разделу 2 модуля 2 того же курса; глава 4 — разделу 1, глава 5 — разделу 4 модуля 3 курса «Виброакустическая безопасность автомобиля и трактора».

Во введении представлены основные положения теории поддрессирования транспортных гусеничных машин, критерии плавности их хода и перспективы развития систем поддрессирования. В главе 1 изложены проблемы быстроходности гусеничных машин и методы их решения. Материал главы 2 посвящен математическому моделированию дорожно-грунтовых условий движения гусеничных машин. В главе 3 исследуются многоуровневые линейные системы поддрессирования. В главе 4 рассмотрены вопросы математического моделирования движения гусеничной машины по неровностям местности. Глава 5 посвящена вопросам управления углом складывания секций двухзвенной гусеничной машины в целях повышения ее быстроходности. Глава 6 содержит описание метода выбора характеристик системы поддрессирования двухзвенных гусеничных машин. Глава 7 посвящена управляемым системам поддрессирования гусеничных и колесных машин. В конце всех глав приведены вопросы для самостоятельного контроля студентами степени усвоения теоретического материала и подготовки к выполнению самостоятельных работ, предусмотренных рабочей программой. Завершает издание список литературы, предназначенной для расширения знаний в области теории поддрессирования гусеничных машин.

Изучение материала пособия позволит студентам:

знать

основные методы теоретического исследования систем поддрессирования двухзвенных гусеничных машин;

уметь

прогнозировать быстроходность двухзвенных гусеничных машин на этапе проектирования;

владеть

методами определения характеристик систем поддрессирования двухзвенных гусеничных машин.

Список принятых сокращений

АЧХ	— амплитудно-частотная характеристика
ВА БТВ	— Военная академия бронетанковых войск имени маршала Советского Союза Р.Я. Малиновского
ВВТ	— вооружение и военная техника
ГМ	— гусеничная машина
ГЦВС	— гидроцилиндры вертикального складывания
ДГМ	— двухзвенная гусеничная машина
МСХ	— многоуровневые скоростные характеристики
МТУ	— моторно-трансмиссионная установка
НСК	— неподвижная система координат
ПВО	— противовоздушная оборона
ПГР	— пневмогидравлическая рессора
ПСК	— подвижная система координат
ПЦ	— пневмоцилиндр
ТТХ	— тактико-технические характеристики
ЭВМ	— электронная вычислительная машина
ABC	— Active Body Control

Список основных принятых обозначений

a	— длина неровности дороги
$\mathbf{a}_{\text{кор}}$	— вектор ускорения Кориолиса
a_k, b_k	— коэффициенты разложения случайной функции $z(x)$
$\ddot{a}_{kj}$	— ускорение оси j -го катка
A_3	— амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы
A_p	— амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы
A_z	— амплитудно-частотная характеристика перемещения
A_z	— амплитудно-частотная характеристика ускорения
$A_{z\ p}$	— амплитудно-частотная характеристика перемещений подрессоренной массы в релаксационной одноопорной системе
$A_{z\ \tau}$	— амплитудно-частотная характеристика перемещений подрессоренной массы в традиционной одноопорной системе
$A_{z\ \phi}$	— амплитудно-частотная характеристика перемещений подрессоренной массы во фрактальной двухуровневой одноопорной системе
$A_{z\ \phi 0}$	— амплитудно-частотная характеристика перемещений подрессоренной массы во фрактальной двухуровневой одноопорной системе с $\mu_2 = 0$
$A_{z1\ \phi}$	— амплитудно-частотная характеристика перемещений невесомой пластины во фрактальной двухуровневой одноопорной системе
$A_{(N)z\ p}$	— амплитудно-частотная характеристика перемещений в разомкнутой N -уровневой системе
b	— длина рычага амортизатора
B	— расстояние между левой и правой колеями машины
c	— жесткость элемента подвески
C	— условная линейная жесткость деталей узла соединения секций
D_h	— дисперсия случайной величины h
D_k	— дисперсия коэффициентов k -й гармоники разложения
D_z	— дисперсия случайной величины z
f	— деформация упругого элемента (ход подвески)
f_0	— суммарный коэффициент сопротивления движению
f_{1i}, f_{2i}	— ходы подвесок секций
$f_{\text{гр}}$	— коэффициент сопротивления прямолинейному движению по грунту
$f_{\text{ст } 1i}, f_{\text{ст } 2i}$	— статические ходы подвесок секций
f_{ij}	— вероятность возникновения i -х и j -х условий движения
$\dot{f}$	— скорость хода подвески
F_a	— сила воздействия амортизатора
F_y	— сила в упругом элементе
F_d	— сила в демпфирующем элементе
$F_s(V)$	— функция быстроходности
$F_{s\ \Pi}(V)$	— функция быстроходности по системе подрессоривания

$F_{sT}(V)$	— функция быстроходности по тяговым свойствам
G	— вес корпуса машины
G_0	— вес машины
h	— высота неровности дороги
h_n	— шаг прогноза при численном моделировании
$h_{ш}$	— расстояние от шарнира узла сочленения до центра тяжести секции по вертикали
h_0	— максимальная высота периодических неровностей дороги, учитывающихся при решении задач плавности хода
h_1	— максимальная высота периодических неровностей дороги, которые машина способна преодолевать во всем скоростном диапазоне
I_φ	— момент инерции корпуса машины относительно оси CY'
I_ψ	— момент инерции корпуса машины относительно оси CX'
k	— отношение математического ожидания числа экстремумов к математическому ожиданию числа нулей случайной функции
k_i	— квадрат собственной частоты
$k_{\max}$	— номер высшей гармоники канонического разложения
k_N	— квадрат собственной частоты N -уровневой одноопорной системы подпрессоривания
k_1	— квадрат собственной частоты одноуровневой одноопорной системы подпрессоривания
k_2	— квадрат собственной частоты двухуровневой одноопорной системы подпрессоривания
K	— вариант подвески
K_n	— коэффициент качества системы подпрессоривания
$l_{м.-в}$	— расстояние от места механика-водителя до центра тяжести корпуса
$l_{ш}$	— расстояние от шарнира узла сочленения до центра тяжести секции по горизонтали
l_i	— расстояние от центра тяжести корпуса машины до оси i -го катка
l_j	— текущая длина гусеницы на j -м участке
l_{0j}	— общее количество недеформированной гусеницы на j -м участке
$\bar{l}_{0j}$	— среднее количество недеформированной гусеницы на j -м участке до поворота ведущего колеса
L	— база секции двухзвенной гусеничной машины
L_1	— расстояние между центрами тяжести секций двухзвенной гусеничной машины
L_2	— база двухзвенной гусеничной машины
m	— подпрессоренная масса
m_k	— масса катка
m_f	— промежуточная масса
M	— момент в узле сочленения
M_t	— крутящий момент моторно-трансмиссионной установки
$M_{\text{тор}}$	— крутящий момент торсионного вала

M_X, M_Y, M_Z	— изгибающие моменты в узле сочленения
$M_{z\ p}$	— амплитудно-частотная характеристика вертикальных перемещений подрессоренной массы в релаксационной многоопорной системе
$M_{z\ t}$	— амплитудно-частотная характеристика вертикальных перемещений подрессоренной массы в традиционной многоопорной системе
$M_{\varphi\ p}$	— амплитудно-частотная характеристика угловых перемещений подрессоренной массы в релаксационной многоопорной системе
$M_{z\ \phi}$	— амплитудно-частотная характеристика вертикальных перемещений подрессоренной массы во фрактальной двухуровневой многоопорной системе
$M_{z\ \phi 0}$	— амплитудно-частотная характеристика вертикальных перемещений подрессоренной массы во фрактальной двухуровневой многоопорной системе с $\mu_2 = 0$
$M_{\varphi\ t}$	— амплитудно-частотная характеристика угловых перемещений подрессоренной массы в традиционной многоопорной системе
$M_{\varphi\ \phi}$	— амплитудно-частотная характеристика угловых перемещений подрессоренной массы во фрактальной двухуровневой многоопорной системе
$M_{\varphi\ \phi 0}$	— амплитудно-частотная характеристика угловых перемещений подрессоренной массы во фрактальной двухуровневой многоопорной системе с $\mu_2 = 0$
$M_{z\ m.-b}$	— амплитудно-частотная характеристика ускорений на месте механика-водителя для многоопорной системы
$\mathbf{n}$	— вектор нормального ускорения
n	— число катков по борту
n_{Π}	— показатель политропы
n_c	— число степеней свободы системы
$n_z, \bar{n}_z$	— соответственно общее и среднее число экстремумов
$n_0, \bar{n}_0$	— соответственно общее и среднее число нулей
N	— число уровней подвески
N_a	— мощность потерь в амортизаторе
$N_{дв}$	— мощность, развиваемая двигателем
N_{Π}	— число вариантов подвесок
$N_{с.п}$	— число связанных между собой подвесок
$N_{y.г}$	— удельная мощность машины, реализуемая на грунте
N_j	— нормальная реакция грунта в j -й площадке контакта
N_z	— число реализаций случайной функции $z(x)$
$p_{zi}(V)$	— вероятность движения со скоростью V_i
P	— силовое воздействие в узле сочленения
P_y	— упругая сила

Оглавление

Предисловие	3
Список принятых сокращений	4
Список основных принятых обозначений	5
Введение	13
Глава 1. Прогнозирование быстроходности двухзвенных гусеничных машин	23
1.1. Определение средней скорости прямолинейного движения гусеничной машины аналитическими методами	23
1.2. Определение средней скорости прямолинейного движения двухзвенной гусеничной машины с использованием имитационного математического моделирования	35
Вопросы и задания для самостоятельной работы	37
Глава 2. Математическое моделирование дорожно-грунтовых условий движения двухзвенной гусеничной машины	38
2.1. Вероятностные характеристики микропрофиля пути	38
2.2. Методы моделирования протяженных участков профиля трассы	43
2.3. Моделирование внешних воздействий на двухзвенную гусеничную машину со стороны микропрофиля в различных условиях движения	48
2.4. Моделирование случайных функций изменения коэффициентов сопротивления движению и сцепления	58
Задания для самостоятельной работы	60
Глава 3. Исследование многоуровневых линейных систем поддрессоривания	61
3.1. Исследование двухуровневых одноопорных систем поддрессоривания	61
3.2. Синтез многоуровневых систем поддрессоривания	73
3.3. Исследование многоопорных систем поддрессоривания	80
Вопросы и задания для самостоятельной работы	91
Глава 4. Математическая модель прямолинейного движения двухзвенной гусеничной машины, оснащенной двухуровневой связанной системой поддрессоривания	92
4.1. Требования к математической модели, процесс моделирования, основные допущения	92
4.2. Моделирование двухуровневой системы поддрессоривания двухзвенной гусеничной машины	94
4.3. Процесс передвижения двухзвенной гусеничной машины при моделировании	95
4.4. Моделирование взаимного положения секций двухзвенной гусеничной машины в пространстве и узла сочленения	98
4.5. Общее уравнение динамики секции двухзвенной гусеничной машины	102
4.6. Уравнения кинематических связей	108
4.7. Дифференциальные уравнения движения секции двухзвенной гусеничной машины	117
4.8. Исследование адекватности и точности математической модели	124
Вопросы и задания для самостоятельной работы	126

Глава 5. Повышение быстроходности двухзвенных гусеничных машин по неровностям дороги посредством управления углом складывания секций в вертикальной плоскости	127
5.1. Исследования влияния угла складывания секций в вертикальной плоскости на плавность хода двухзвенной гусеничной машины при преодолении единичных препятствий	127
5.2. Влияние гармонического воздействия в узле сочленения на плавность хода двухзвенной гусеничной машины	131
5.3. Закон управления углом складывания секций двухзвенной гусеничной машины при движении по неровностям дороги	139
Вопросы и задания для самостоятельной работы	142
Глава 6. Определение характеристик нелинейной системы поддрессирования двухзвенной гусеничной машины. Оценка эффективности закона управления углом складывания секций	143
6.1. Метод выбора характеристик двухуровневой связанной системы поддрессирования двухзвенной гусеничной машины	143
6.2. Оценка эффективности закона управления углом складывания секций путем сравнения быстроходности двухзвенных гусеничных машин	149
Вопросы и задания для самостоятельной работы	164
Глава 7. Управляемые системы поддрессирования	165
7.1. Классификация и конструкции управляемых систем поддрессирования транспортных гусеничных машин	165
7.2. Алгоритмы управления демпфированием в системе поддрессирования	172
Вопросы и задания для самостоятельной работы	193
Литература	194

Учебное издание

Котиев Георгий Олегович, **Сарач** Евгений Борисович, **Стадухин** Антон Алексеевич

Теория поддрессирования высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 10.03.2023. Формат 70×100/16.

Усл. печ. л. 15,9. Тираж 300 экз. Изд. № 1172-2022.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

info@bmstu.press

<https://bmstu.press>

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

baumanprint@gmail.com