

УДК (UDC) 621.86

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ В ТЯГОВЫХ КОНТУРАХ
ГУСЕНИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОСТИ
СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ГРУНТОВSIMULATION OF DISTRIBUTION OF FORCES IN TRACTION CIRCUIT
TRACKED CHASSIS UNDER CONDITIONS OF VARIABILITY
GROUND RESISTANCEГончаров К.А.
Goncharov K.A.Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)
Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. Гусеничный движитель конструктивно состоит из двух и более тяговых контуров, воспринимающих равномерно или неравномерно распределенный вес самой машины и нагрузку от реализуемых технологических операций. В настоящей статье описываются результаты математического моделирования распределения усилий в тяговых контурах гусеничных движителей в условиях переменности сопротивления движению грунтов, возникающей при работе машины на стыках грунтовых пластов, а также в грунтах со смешанным составом. В зависимости от геометрических параметров гусеничного шасси (базы и колеи) и скорости его движения каждая из гусениц внутри единой системы может взаимодействовать с различными по уровню сопротивления грунтами, что приводит к явлению забегания гусениц, резкому повышению нагрузки на двигатели в результате поворота гусениц и подрезания слоев грунтового пласта, особенно при применении раздельного привода. Полученные результаты могут быть применены в процессе проектирования систем управления гусеничными движителями различных транспортно-технологических машин и комплексов с возможностями управления как механическими характеристиками двигателей приводов, так и натяжением гусеничных лент внутри гусеничных контуров.

Ключевые слова: гусеничный движитель, тяговый расчет, сопротивление движению.

Дата принятия к публикации: 31.05.2023
Дата публикации: 25.06.2023

Сведения об авторе:

Гончаров Кирилл Александрович – доктор технических наук, доцент, заместитель директора НИИ фундаментальных и прикладных исследований по проектному управлению и цифровому развитию ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»,

e-mail: goncharov_bgu@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-5895-1162

Abstract. Tracked chassis structurally consists of two or more traction circuits that perceive the evenly or unevenly distributed weight of the machine itself and the load from the ongoing technological operations. This article describes the results of mathematical modeling of the distribution of forces in the traction circuits of tracked chassis under conditions of variability in resistance to soil movement that occurs when the machine is operating at the junctions of soil layers, as well as in soils with a mixed composition. Depending on the geometric parameters of the tracked chassis (base and track) and the speed of its movement, each of the tracks within a single system can interact with soils of different levels of resistance, which leads to the phenomenon of running tracks, a sharp increase in the load on the engines as a result of turning the tracks and undercutting the layers of the soil layer, especially when using a separate drive. The results obtained can be applied in the process of designing control systems for tracked chassis of various transport and technological machines and complexes with the ability to control both the mechanical characteristics of drive motors and the tension of tracked belts inside the tracked circuits.

Keywords: tracked chassis, traction calculation, movement resistance.

Date of acceptance for publication: 31.05.2023
Date of publication: 25.06.2023

Author' information:

Kirill A. Goncharov – Doctor of Technical Sciences, associate Professor, Vice director of project management and digital development at Institute of Fundamental and Applied Research, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University,

e-mail: goncharov_bgu@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-5895-1162

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект №22-29-00798)

Acknowledgements

This study was supported by grant of Russian science Foundation (project №22-29-00798)

1. Введение

Сопrotивление движению грунтов в традиционных системах инженерных расчетов предлагается учитывать соответствующим коэффициентом сопротивления, уникальным для каждого типа грунта. Подобный подход прост и удобен в случае необходимости определения обобщенного сопротивления движению машины и вычисления необходимой минимальной мощности привода для реализации тягового усилия. При этом сам по себе коэффициент сопротивления движению представляет собой некое усредненное значение, формируемое для каждого типа грунта, не учитывающее ряд факторов:

1) неравномерность гранулометрического состава различных типов грунтов (подвижность и связанность частиц при наличии в структуре грунта составляющих различных типов, смерзаемость, слеживаемость);

2) влияние погодных условий на влажность грунта (взаимодействие грунта с гигроскопической влагой (способность впитывать влагу из окружающей среды), особенности образования пленки на поверхности грунта (внешняя пленочная влага);

3) абразивность внешнего слоя грунта, взаимодействующего с гусеничными лентами.

Реальная работа гусеничного шасси подразумевает следующие возможности взаимодействия с грунтом:

1) гусеничные контуры внутри единого шасси контактируют с различными типами грунтов на их стыке;

2) гусеничные контуры внутри единого шасси контактируют с одним типом грунта, но с разными по свойствам пластами;

3) появление процессов среза боковыми гранями гусеничных лент различных по свойствам пластов грунта в результате забегания гусениц;

4) указанные выше случаи с учетом неравномерности распределения веса машины и полезной нагрузки от выполняемых техноло-

гических операций на гусеничные контуры в системе одного гусеничного шасси.

С учетом современного уровня развития возможностей математического моделирования, анализа данных нет необходимости вычленять какие либо усредненные значения коэффициентов сопротивления движению гусеничных лент в зависимости от типов грунтов. В данном случае целесообразно весь массив применяемых коэффициентов сопротивления грунтов разбить на короткие дискретные интервалы с дальнейшей последовательной подстановкой в математическую модель распределения усилий внутри гусеничных контуров.

Решение подобной задачи позволит гибко находить режимы управления как механическими характеристиками отдельных приводов гусеничных контуров, так и натяжением гусеничных лент в контурах, в том числе при центральной схеме установки привода на несколько гусениц внутри шасси. Второй случай особенно важен, так как управление натяжными устройствами остается единственным путем стабилизации нагрузки на гусеницу, поскольку центральный привод взаимодействует со всеми гусеничными контурами шасси в рамках единой механической характеристики.

2. Цель исследования

Целью настоящего исследования является математическое моделирование распределения усилий в тяговых контурах гусеничных движителей в условиях переменности сопротивления движению грунтов, возникающей при работе машины на стыках грунтовых пластов, а также в грунтах со смешанным составом. В качестве особенности процесса моделирования предполагается уход от привязки исследования к различным типам грунтов и исследование всего спектра сопротивлений движению в контексте применения дискретных значений с короткими интервалами.

3. Особенности моделирования

В работе [1] описан инверсионный подход к тяговому расчету гусеничных движителей подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин, на основании которого предложена математическая модель работы замкнутого контура гусеницы как машины непрерывного транспорта. В рамках настоящей статьи анализируются результаты взаимодействия двух параллельно функционирующих моделей, имитирующих работу двух гусеничных контуров внутри шасси.

В процессе моделирования использована шкала коэффициентов сопротивления движению, представленная в [2 - 4]. Моделирование проводилось для тягового режима работы гусениц, как для наиболее невыгодного в плане распределения натяжений в гусеничном контуре [1].

Последовательность моделирования базировалась на следующих принципах:

1) первый из двух тяговых контуров шасси работает при минимальном коэффициенте сопротивления движению $\mu_f = 0,065$ (соответствует асфальтовому или бетонному покрытию);

2) коэффициент сопротивления движению для второго тягового контура в каждой итерации изменяется в сторону повышения с шагом 0,05, переходя в категории других типов грунтов, что отражается в их условном качественном описании;

3) в каждой итерации определяется величина необходимого минимального натяжения гусеничной ленты первого тягового контура, позволяющая провести выравнивание тяговых усилий для каждой гусеницы, что при одинаковом виде механических характеристик каждого из отдельных приводов приведет к стабилизации скоростей движения гусеничных лент.

В качестве объекта моделирования выбрано гусеничное шасси (рис. 1) [1].

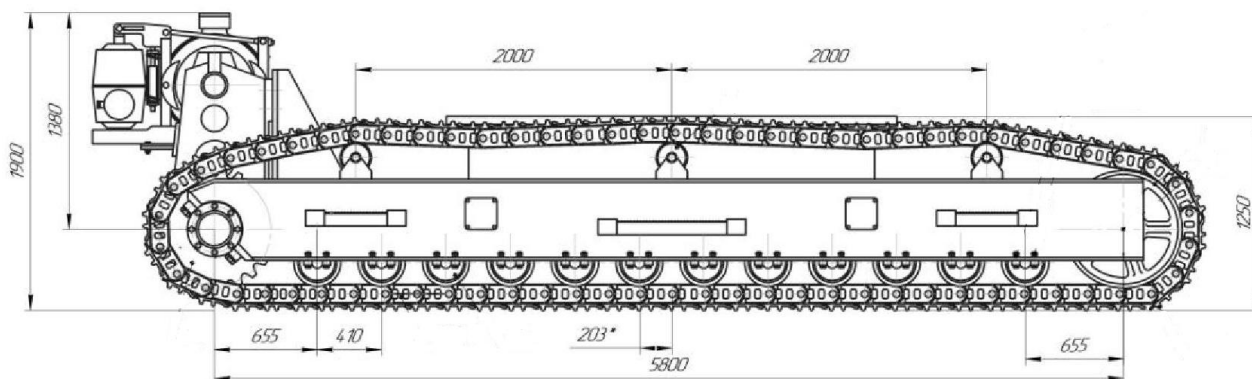


Рис. 1. Конструктивное исполнение гусеничного движителя

Исходные конструктивные и нагрузочные параметры для проведения моделирования представлены в работе [1]. Минимальное натяжение ленты, определяемое из условия допустимого провисания гусеничной цепи, в стартовой и последующих итерациях составляет 12500 Н.

Результаты моделирования представлены в таблице 1. Для удобства представления данных в табл. 1 приняты следующие обозначения:

1) μ_f [...] – интервал коэффициентов сопротивления катанию;

2) μ_f – коэффициент сопротивления катанию;

3) S_{\max} и S_{\min} – соответственно максимальное и минимальное натяжение гусеничной цепи;

4) W – необходимое тяговое усилие;

5) S_c – минимальное натяжение гусеничной цепи первого контура для выравнивания тяговых усилий;

6) S_{\max} – максимальное натяжение гусеничной цепи первого контура после выравнивания тяговых усилий.

Индекс 1 соответствует первому гусеничному контуру, 2 – второму.

Таблица 1

Результаты моделирования распределения усилий в тяговых контурах гусеничных движителей в условиях переменности сопротивления движению грунтов

Описание вида и состояния грунта	$\mu_f [\dots]$	μ_1	μ_2	S_{max1}	W_1	S_{min1}	S_c	S_{vmax}	S_{max2}	W_2	S_{min2}
Асфальт и бетон	0,065... 0,07	0,065	0,065	53578	41078	12500	12500	53578	53578	41078	12500
Асфальт и бетон	0,065... 0,07	0,065	0,07	53578	41078	12500	20935	63196	54762	42262	12500
Лежневые, гравийные, укатанные грунтовые дороги	0,065... 0,085	0,065	0,075	53578	41078	12500	29370	72815	55946	43446	12500
–	0,065... 0,085	0,065	0,08	53578	41078	12500	37810	82439	57130	44630	12500
–	0,065... 0,085	0,065	0,085	53578	41078	12500	46250	92064	58314	45814	12500
Снежные укатанные дороги	0,065... 0,09	0,065	0,09	53578	41078	12500	54690	101688	59498	46998	12500
Переход с асфальта и бетона на влажный луг с песчаной подпочвой	0,065...0,1	0,065	0,095	53578	41078	12500	63130	111312	60682	48182	12500
Влажный луг с песчаной подпочвой	0,065...0,1	0,065	0,1	53578	41078	12500	71570	120937	61866	49366	12500
Твердую неукатанная дорога	0,065... 0,115	0,065	0,105	53578	41078	12500	80005	130555	63050	50550	12500
–	0,065... 0,115	0,065	0,11	53578	41078	12500	88440	140174	64234	51734	12500
–	0,065... 0,115	0,065	0,115	53578	41078	12500	96880	149798	65418	52918	12500
Неукатанная грязная или проселочная дорога, влажный песок	0,065... 0,145	0,065	0,12	53578	41078	12500	105320	159423	66602	54102	12500
–	0,065... 0,145	0,065	0,125	53578	41078	12500	113755	169041	67786	55286	12500
–	0,065... 0,145	0,065	0,13	53578	41078	12500	122190	178660	68971	56471	12500
–	0,065... 0,145	0,065	0,135	53578	41078	12500	130630	188285	70155	57655	12500
–	0,065... 0,145	0,065	0,14	53578	41078	12500	139070	197909	71339	58839	12500
–	0,065... 0,145	0,065	0,145	53578	41078	12500	147505	207528	72523	60023	12500

4. Анализ результатов моделирования

Анализируя представленные в табл. 1 данные можно выделить тенденции роста тягового усилия второго гусеничного контура при возрастании соответствующего ему коэффициента сопротивления катанию и минимального натяжения гусеничной ленты первого контура, необходимого для выравнивания тяговых усилий контуров, при наименьшем значении коэффициента сопротивления катанию. Указанные данные целесообразно представить в виде графика (рис. 2).

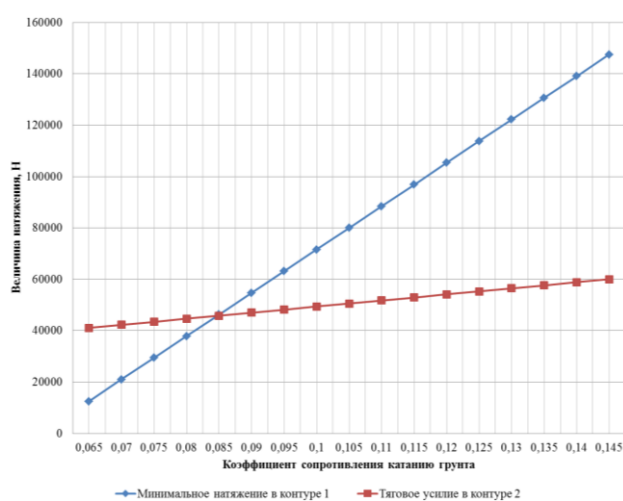


Рис. 2. Тенденции роста тягового усилия и минимального натяжения для его достижения

Скорость роста минимально необходимого натяжения в тяговом контуре для выравнивания тяговых усилий значительно превышает скорость роста самих тяговых усилий при увеличении коэффициента сопротивления катанию грунта. Точка пересечения двух графиков показывает, что с увеличением коэффициента сопротивления примерно на 0,02 управление тяговыми усилиями контуров посредством изменения натяжения в них становится неэффективным, так как при коэффициенте 0,085 реализуемое тяговое усилие соразмерно требуемому минимальному натяжению в контуре.

При уменьшении минимально допустимого натяжения в контуре, определяемого ограничением провисания, угол наклона кривых немного уменьшается, но не приво-

дит к кардинальному изменению картины роста тяговых усилий и натяжений.

Также целесообразно проанализировать тенденции изменения максимального натяжения гусеничных лент в тяговых контурах при росте коэффициента сопротивления движению (рис. 3).

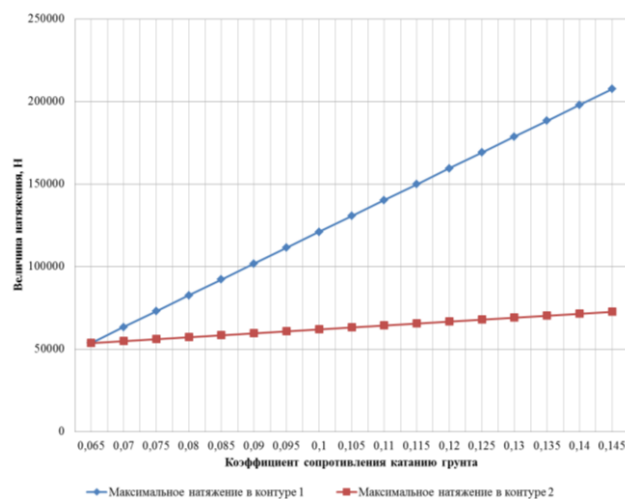


Рис. 3. Тенденции изменения максимального натяжения гусеничных лент в тяговых контурах

При возрастании коэффициента сопротивления движению от значения 0,065 до 0,145 для гусеничной ленты второго контура величина её максимального натяжения увеличивается в 1,35 раза (с 53578 Н до 72523 Н). Одновременно, манипулируя натяжением гусеничной ленты в первом тяговом контуре (для которого коэффициент сопротивления движению остается равным 0,065), удастся достигнуть равенства тяговых усилий, необходимых для движения контуров, увеличением максимального натяжения ленты до значения 207528 Н, что превышает максимальное натяжение в этот же момент времени в первом контуре в 2,86 раза.

Максимальное натяжение ленты первого контура, соответствующее максимальному натяжению ленты второго контура 72523 Н при наибольшем значении коэффициента сопротивления катанию 0,145 достигается уже при выравнивании тяговых усилий в случае движения второго контура с коэффициентом сопротивления 0,075. Данное обстоятельство также ограничивает возможности применения способа регулирования натяжения в гу-

сеничном контуре для выравнивания необходимых тяговых усилий.

С учетом проведенного анализа можно установить два интервала коэффициента сопротивления катанию в зависимости от типа грунта, в рамках которых допустимо осуществлять выравнивание тяговых усилий изменением натяжений в контурах. Указанные интервалы обусловлены двумя факторами:

1) соотношением скоростей роста тягового усилия и минимального натяжения в тяговом контуре для его достижения (интервал составляет 0,065...0,085);

2) соотношением максимальных натяжений гусеничных лент в тяговых контурах при выравнивании тяговых усилий и разных величинах коэффициента сопротивления катанию (интервал составляет 0,065...0,075).

Таким образом, можно сделать вывод, что выравнивание тяговых усилий тяговых контуров изменением натяжения лент не имеет эффективности на всем отрезке роста коэффициента сопротивления катанию, а эффективно на лишь участке (0,065...0,075), соответствующем переходу с асфальта на лежневые, гравийные или укатанные грунтовые дороги.

Дополнительно стоит отметить особенно-сти возрастания тягового усилия в контуре с возрастанием коэффициента сопротивления катанию. При возрастании коэффициента в 2,23 (0,065...0,145) раза тяговое усилие возрастает в 1,46 раза (41078...60023). Отсутствие кратного роста тягового усилия позволяет сделать вывод о существенном значении

других внутренних сопротивлений тягового контура в контексте поиска точных значений коэффициентов сопротивления катанию грунта при проведении проектных процедур тягового расчета гусеничных движителей.

5. Заключение.

Проведенное в настоящей статье моделирование распределения усилий в тяговых контурах гусеничных движителей в условиях переменности сопротивления движению грунтов, возникающей при работе машины на стыках грунтовых пластов, а также в грунтах со смешанным составом, позволило выявить несостоятельность применения автоматических средств регулирования натяжения гусеничных лент на всем спектре изменения коэффициента сопротивления катанию. Подобное регулирование является целесообразным при изменении свойств грунта, с которым взаимодействуют обе гусеницы шасси (от одной гусеницы к другой), соответствующем интервалу изменения коэффициента сопротивления катанию $\pm 0,1$.

Стоит отметить, что проведенное исследование охватывало сравнительное взаимодействие гусеничных контуров с грунтом по отношению к минимальному коэффициенту сопротивления катанию. Для создания более полной картины и уточнения рекомендаций по способам регулирования тяговых усилий подобное моделирование необходимо провести для каждой группы грунтов.

Список литературы

1. Гончаров К.А. Инверсионный подход к тяговому расчету гусеничных движителей подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2022. №2. С. 94–102. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-94-102.

2. Гончаров К.А., Толкачев Е.Н. Основы расчета и конструирования грузоподъемных машин. Курск: Изд-во ЗАО "Университетская книга", 2019. 195 с.

3. Домбровский Н.Г., Картвелишвили

References

1. Goncharov K.A. Inversion approach to traction calculation of tracked chassis of hoisting, construction, and road machines. *Nauchnotekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 94-102. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-94-102 (In Russian)

2. Goncharov K.A., Tolkachev E.N. *Osnovy rascheta i konstruirovaniya gruzopodemnyh mashin* [Fundamentals of calculation and design of lifting machines]. Kursk, ZAO Universitetskaya kniga, 2019. 195

Ю.Л., Гальперин М.И. Строительные машины. В 2-х ч. Ч. 1. М: Машиностроение, 1976. 391 с.

4 Шеффлер М., Пайер Г., Курт Ф. Основы расчета и конструирования подъемно-транспортных машин. М: Машиностроение, 1980. 255 с.

† p. (In Russian)

† 3. Dombrovskiy N.G., Kartvelishvili Yu.L., Galperin M.I. *Stroitelnye mashiny* [Construction machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1976. 391 p. (In Russian)

† 4. Scheffler M., Pajer G., Kurth F. *Osnovy rascheta i konstruirovaniya podmno-transportnyh mashin* [Fundamentals of calculation and design of lifting and transport machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1980. 255 p. (In Russian)