

УДК (UDC) 621.86

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕННОГО  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА НА ПОЛОЖЕНИЕ  
ГУСЕНИЧНЫХ ШАССИ В ДВИЖЕНИИTHEORETICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF A VARIABLE  
GROUND RESISTANCE BY POSITION  
TRACKED CHASSIS IN MOTIONГончаров 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.** Положением гусеничного шасси машины в движении зачастую определяется точность создания сопутствующих сооружений при проведении строительных и дорожных работ. Существуют технические решения систем позиционирования шасси в нескольких плоскостях, опирающиеся на технологии лазерного нивелирования. Данные системы реализуют следящий принцип контроля положения шасси, реагируя на ненормированные изменения положения. Программная реализация контроля положения, основанная на его прогнозировании в процессе работы сложна в исполнении, так как должна учитывать влияние множества случайных факторов на движение машины (переменность сил сопротивления движению во времени т.п.). В настоящей статье рассмотрено влияние переменного сопротивления движению грунта на положение гусеничных шасси в движении. Показаны специфические аспекты, характеризующие изменение положения машины в зависимости от сочетания законов изменения коэффициентов сопротивления движению под каждой гусеницей. На примерах показаны процедуры математического прогнозирования физических и геометрических характеристик движения гусеничной машины, применение которых в программных алгоритмах систем контроля положения может способствовать повышению точности их работы.

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

**Дата получения статьи:** 05.07.2023  
**Дата принятия к публикации:** 21.09.2023  
**Дата публикации:** 25.09.2023

**Сведения об авторе:**

**Гончаров Кирилл Александрович** – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационному развитию, информатизации и цифровой трансформации ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», e-mail: goncharov\_bgu@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-5895-1162

**Abstract.** The position of the tracked chassis of a vehicle in motion often determines the accuracy of the creation of related structures during construction and road work. There are technical solutions for chassis positioning systems in several planes, based on laser leveling technologies. These systems implement the tracking principle of monitoring the position of the chassis, reacting to abnormal changes in position. Software implementation of position control based on its prediction during operation is difficult to implement, since it must take into account the influence of many random factors on the movement of the machine (variability of movement resistance forces over time, etc.). This article examines the influence of variable resistance to ground movement on the position of tracked chassis in motion. Specific aspects are shown that characterize the change in the position of the machine depending on the combination of laws of change in the coefficients of resistance to movement under each caterpillar. The examples show procedures for mathematical prediction of the physical and geometric characteristics of the movement of a tracked vehicle, the use of which in software algorithms of position control systems can help improve the accuracy of their operation.

**Keywords:** tracked chassis, traction calculation, movement resistance, ground.

**Date of manuscript reception:** 05.07.2023  
**Date of acceptance for publication:** 21.09.2023  
**Date of publication:** 25.09.2023

**Author' information:**

**Kirill A. Goncharov** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Innovative Development, Informatization and Digital Transformation at 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

Позиционирование рабочих органов и машин в целом при проведении планировочных работ на строительных объектах является важной задачей, что, в том числе, определяется конкуренцией систем позиционирования, предлагаемых на соответствующих рынках в данной отрасли.

В источнике [1] проведен обзор систем позиционирования для экскаваторной техники. Авторы выделили несколько групп технологий, используемых для позиционирования:

- спутниковые навигационные системы;
- радиочастотные технологии (включая радиочастотные метки – RFID);
- технологии инфракрасного и ультразвукового позиционирования;
- лазерное (оптическое) позиционирование;
- системы видеонаблюдения с ручным корректированием положения.

Наибольшей популярностью пользуются системы спутниковой навигации и лазерного (оптического) позиционирования. Наилучшая достигаемая ими точность позиционирования, описываемая изготовителями, составляет, в среднем, до 10 мм.

Основной управленческий принцип работы указанных выше систем – следящее управление, при котором система реагирует на появление источников внешних воздействий по факту уже произведенного на объект воздействия. Данный принцип фактически позволяет лишь исправлять уже приобретенные объектом отклонения.

Более прогрессивным с позиции управления является программное воздействие на объект, при котором поведение внешних факторов предварительно прогнозируется, и в момент воздействия объект уже находится под соответствующим управляющим противодействием, компенсирующим возможные отклонения характеристик объекта.

В работах [2, 3] предложены основные принципы расчета гусеничных контуров шасси как отдельных машин непрерывного

транспорта, показаны возможности данного подхода к изучению взаимодействия данных контуров в случае их исполнения с раздельным приводом. Фактор использования раздельного привода и разъединение действующих сопротивлений движению по соответствующим контурам создает предпосылки для создания ряда математических моделей, описывающих процессы движения гусеничного шасси с учетом внутренних особенностей работы (внутренних по отношению к факторам, воздействующим на шасси в целом, а не на каждый гусеничный контур).

Изучение протекания внутренних процессов в гусеничном шасси (распределение различных сопротивлений движению между контурами, тяговых усилий, взаимного движения контуров в случае реализации ими разных скоростей, отклонение механических характеристик приводов и т.д.) позволит усовершенствовать математическую и физическую базу для создания программных систем позиционирования специальных машин, работающих на шасси данного типа.

## 2. Цель исследования

Целью настоящего исследования является изучение влияния переменного сопротивления грунта на положение гусеничного шасси в движении. При проведении исследования предполагается сравнение результатов моделирования движения шасси при различных сочетаниях законов изменения коэффициента сопротивления движению грунта. Результат исследования на данном этапе может отразить некоторые обобщенные тенденции при выборе законов изменения коэффициента сопротивления во времени, а также являться примером реализации процедур математического прогнозирования физических и геометрических характеристик движения гусеничной машины.

### 3. Особенности проведения исследования

Исследование, описанное в настоящей статье, основано на реализации математических моделей, предложенных в [2, 3].

Исследование включает в себя 3 этапа:

1) первый этап – коэффициенты сопротивления движению грунта во времени для соответствующих гусеничных контуров незначительно сдвинуты по фазе, диапазон изменения коэффициентов максимально расширен;

2) второй этап – коэффициенты сопротивления движению грунта гусеничных контуров находятся в противофазе, диапазон изменения коэффициентов также максимально расширен;

3) третий этап – коэффициенты сопротивления движению грунта гусеничных контуров находятся в противофазе, при этом для первого контура коэффициент изменяется в верхней половине максимального диапазона, для второго контура – в нижней половине.

### 4. Первый этап исследования

Функции изменения коэффициента сопротивления движению грунта во времени определяются выражениями

$$\mu_{f1}(t) = 0,04 \cos\left(\frac{90\pi t}{180}\right) + 0,105,$$

$$\mu_{f2}(t) = 0,04 \cos\left(\frac{100\pi t}{180}\right) + 0,105.$$

Графический вид данных функций представлен на рис. 1.

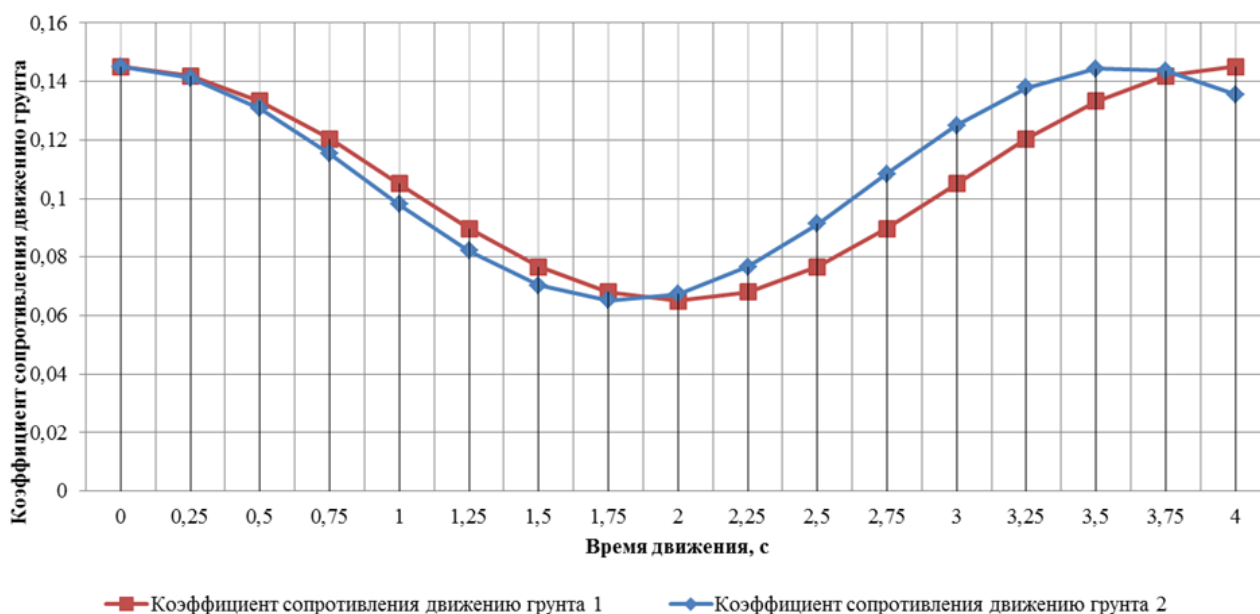


Рис. 1. Графики изменения коэффициента  $\mu_f$  во времени

Для каждого значения коэффициента сопротивления движению в соответствующий момент времени проведем процедуру тягового расчета с учетом зависимостей, представленных в работах [2, 3]. Результаты тягового расчета (в толкающем режиме) представлены в табл. 1.

Графическая интерпретация разности скоростей движения тяговых контуров в каждый момент времени в пределах 4-х секунд движения машины показана на рис. 2.

Результаты расчетов геометрических параметров позиционирования шасси приведены в табл. 2.

На рис. 3 показаны графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси. На рис. 4 – график изменения угла поворота машины во времени.

Таблица 1

Результаты тягового расчета гусеничных контуров в толкающем режиме

Время $t$ , с	$\mu_{f1}$	$S_{min1}$ , Н	$S_{max1}$ , Н	$F_{мяз1}$ , Н	$v_1$ , м/с	$\mu_{f2}$	$S_{min2}$ , Н	$S_{max2}$ , Н	$F_{мяз2}$ , Н	$v_2$ , м/с
0	0,145	12500	65804,04	53304,04	0,328373	0,145	12500	65804,04	53304,04	0,328373
0,25	0,141955	12500	65171,72	52671,72	0,329222	0,141252	12500	65025,75	52525,75	0,329419
0,5	0,133284	12500	63371,02	50871,02	0,331642	0,130712	12500	62836,74	50336,74	0,332360
0,75	0,120307	12500	60676,10	48176,10	0,335263	0,115353	12500	59647,18	47147,18	0,336646
1	0,105	12500	57497,21	44997,21	0,339535	0,098054	12500	56054,75	43554,75	0,341473
1,25	0,089692	12500	54318,33	41818,33	0,343807	0,082057	12500	52732,62	40232,62	0,345937
1,5	0,076715	12500	51623,40	39123,40	0,347428	0,070359	12500	50303,30	37803,30	0,349202
1,75	0,068044	12500	49822,71	37322,71	0,349847	0,065152	12500	49222,00	36722,00	0,350655
2	0,065	12500	49190,39	36690,39	0,350697	0,067412	12500	49691,36	37191,36	0,350024
2,25	0,068044	12500	49822,71	37322,71	0,349847	0,076716	12500	51623,40	39123,40	0,347428
2,5	0,076715	12500	51623,40	39123,40	0,347428	0,091319	12500	54656,11	42156,11	0,343353
2,75	0,089692	12500	54318,33	41818,33	0,343807	0,108486	12500	58221,20	45721,20	0,338562
3	0,105	12500	57497,21	44997,21	0,339535	0,125	12500	61650,62	49150,62	0,333954
3,25	0,120307	12500	60676,10	48176,10	0,335263	0,137766	12500	64301,76	51801,76	0,330391
3,5	0,133284	12500	63371,02	50871,02	0,331642	0,144392	12500	65677,84	53177,84	0,328542
3,75	0,141955	12500	65171,72	52671,72	0,329222	0,143637	12500	65520,99	53020,99	0,328753
4	0,145	12500	65804,04	53304,04	0,328373	0,135642	12500	63860,61	51360,61	0,330984



Рис. 2. Графики изменения скоростей движения контуров во времени

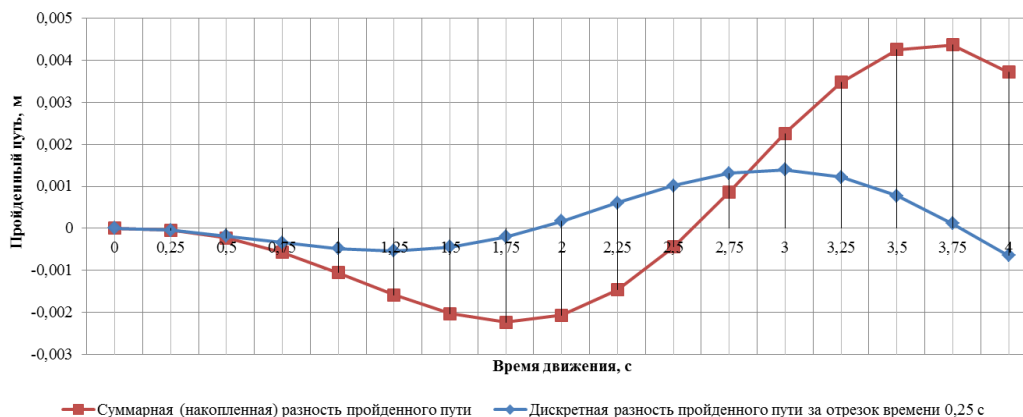


Рис. 3. Графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси

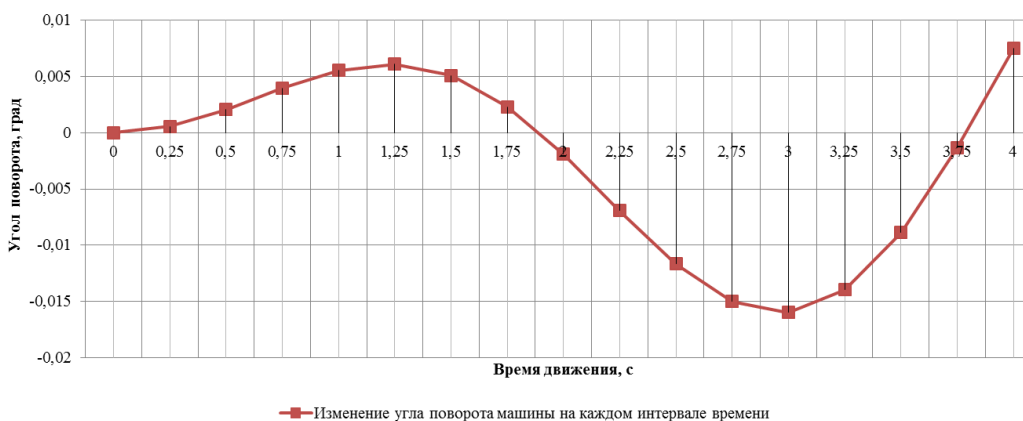


Рис. 4. График изменения угла поворота машины во времени

Таблица 2

Расчетные значения параметров движения для построения траекторий

Время $t$ , с	$v_1$ , м/с	$L_1$ , м	$R_1$ , м	$v_2$ , м/с	$L_2$ , м	$R_2$ , м	$\alpha$ , град	$b$ , м
0	0,328373	0,082093303	0	0,328373	0,082093303	0	0	5
0,25	0,329222	0,082305721	8392,5682	0,329419	0,082354756	8397,5682	0,0005618	5
0,5	0,331642	0,082910637	2309,6680	0,332360	0,083090123	2314,6680	0,0020567	5
0,75	0,335263	0,083815957	1212,4393	0,336646	0,084161607	1217,4393	0,0039608	5
1	0,339535	0,084883855	875,85986	0,341473	0,08536843	880,85986	0,0055528	5
1,25	0,343807	0,085951754	806,76024	0,345937	0,086484451	811,76024	0,0061042	5
1,5	0,347428	0,086857074	979,28739	0,349202	0,087300545	984,28739	0,0050818	5
1,75	0,349847	0,08746199	2167,0539	0,350655	0,087663789	2172,0539	0,0023124	5
2	0,350697	0,087674408	-2604,8465	0,350024	0,087506117	-2599,8465	-0,0019284	5
2,25	0,349847	0,08746199	-722,92696	0,347428	0,086857074	-717,92696	-0,0069318	5
2,5	0,347428	0,086857074	-426,27417	0,343353	0,085838281	-421,27417	-0,0116745	5
2,75	0,343807	0,085951754	-327,7821	0,338562	0,084640643	-322,7821	-0,0150242	5
3	0,339535	0,084883855	-304,18294	0,333954	0,083488579	-299,18294	-0,015988	5
3,25	0,335263	0,083815957	-344,07526	0,330391	0,082597968	-339,07526	-0,0139571	5
3,5	0,331642	0,082910637	-534,9492	0,328542	0,082135697	-529,9492	-0,0088801	5
3,75	0,329222	0,082305721	-3507,3738	0,328753	0,082188388	-3502,3738	-0,001344	5
4	0,328373	0,082093303	628,71543	0,330984	0,082746168	633,71543	0,0074812	5

### 5. Второй этап исследования

Функции изменения коэффициента сопротивления движению грунта во времени на втором этапе имеют вид

$$\mu_{f1}(t) = 0,04 \cos\left(\frac{90\pi t}{180}\right) + 0,105,$$

$$\mu_{f2}(t) = 0,04 \cos\left(\frac{180\pi t}{180}\right) + 0,105.$$

Графическое изображение данных функций представлено на рис. 5.

Результаты тягового расчета (в толкающем режиме) представлены в табл. 3.

Графическая интерпретация разности скоростей движения тяговых контуров показана на рис. 6.

Результаты расчетов геометрических параметров позиционирования шасси приведены в табл. 4.

На рис. 7 показаны графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси. На рис. 8 – график изменения угла поворота машины во времени.

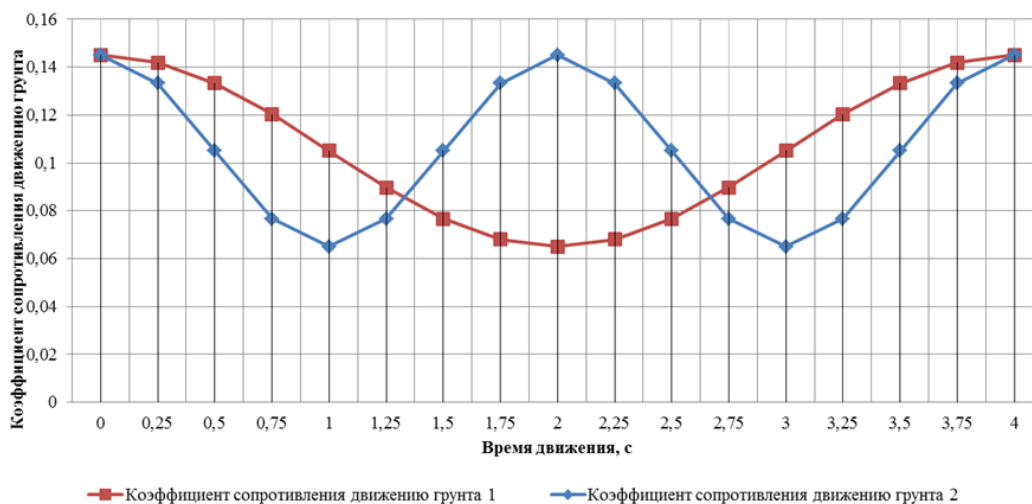


Рис. 5. Графики изменения коэффициента  $\mu_f$  во времени

Таблица 3

Результаты тягового расчета гусеничных контуров в толкающем режиме

Время $t$ , с	$\mu_{f1}$	$S_{min1}$ , Н	$S_{max1}$ , Н	$F_{тяг1}$ , Н	$v_1$ , м/с	$\mu_{f2}$	$S_{min2}$ , Н	$S_{max2}$ , Н	$F_{тяг2}$ , Н	$v_2$ , м/с
0	0,145	12500	65804,04	53304,04	0,328373	0,145	12500	65804,04	53304,04	0,328373
0,25	0,141955	12500	65171,72	52671,72	0,329222	0,133284	12500	63371,02	50871,02	0,331642
0,5	0,133284	12500	63371,02	50871,02	0,331642	0,105	12500	57497,21	44997,21	0,339535
0,75	0,120307	12500	60676,10	48176,10	0,335263	0,076716	12500	51623,40	39123,40	0,347428
1	0,105	12500	57497,21	44997,21	0,339535	0,065	12500	49190,39	36690,39	0,350697
1,25	0,089692	12500	54318,33	41818,33	0,343807	0,076716	12500	51623,40	39123,40	0,347428
1,5	0,076715	12500	51623,40	39123,40	0,347428	0,105	12500	57497,21	44997,21	0,339535
1,75	0,068044	12500	49822,71	37322,71	0,349847	0,133284	12500	63371,02	50871,02	0,331642
2	0,065	12500	49190,39	36690,39	0,350697	0,145	12500	65804,04	53304,04	0,328373
2,25	0,068044	12500	49822,71	37322,71	0,349847	0,133284	12500	63371,02	50871,02	0,331642
2,5	0,076715	12500	51623,40	39123,40	0,347428	0,105	12500	57497,21	44997,21	0,339535
2,75	0,089692	12500	54318,33	41818,33	0,343807	0,076716	12500	51623,40	39123,40	0,347428
3	0,105	12500	57497,21	44997,21	0,339535	0,065	12500	49190,39	36690,39	0,350697
3,25	0,120307	12500	60676,10	48176,10	0,335263	0,076716	12500	51623,40	39123,40	0,347428
3,5	0,133284	12500	63371,02	50871,02	0,331642	0,105	12500	57497,21	44997,21	0,339535
3,75	0,141955	12500	65171,72	52671,72	0,329222	0,133284	12500	63371,02	50871,02	0,331642
4	0,145	12500	65804,04	53304,04	0,328373	0,145	12500	65804,04	53304,04	0,328373



Рис. 6. Графики изменения скоростей движения контуров во времени

Таблица 4

Расчетные значения параметров движения для построения траекторий

Время $t$ , с	$v_1$ , м/с	$L_1$ , м	$R_1$ , м	$v_2$ , м/с	$L_2$ , м	$R_2$ , м	$\alpha$ , град	$b$ , м
0	0,328373	0,082093303	0	0,328373211	0,082093303	0	0	5
0,25	0,329222	0,082305721	680,3072421	0,331642546	0,082910637	685,3072421	0,0069318	5
0,5	0,331642	0,082910637	210,08982	0,339535422	0,084883855	215,08982	0,0226114	5
0,75	0,335263	0,083815957	137,8045529	0,347428297	0,086857074	142,8045529	0,0348486	5
1	0,339535	0,084883855	152,0914703	0,350697633	0,087674408	157,0914703	0,031977	5
1,25	0,343807	0,085951754	474,7034637	0,347428297	0,086857074	479,7034637	0,0103742	5
1,5	0,347428	0,086857074	-220,08982	0,339535422	0,084883855	-215,08982	-0,0226114	5
1,75	0,349847	0,08746199	-96,083496	0,331642546	0,082910637	-91,083496	-0,0521546	5
2	0,350697	0,087674408	-78,545735	0,328373211	0,082093303	-73,545735	-0,0639547	5
2,25	0,349847	0,08746199	-96,08349	0,331642546	0,082910637	-91,08349	-0,0521546	5
2,5	0,347428	0,086857074	-220,08981	0,339535422	0,084883855	-215,08981	-0,0226114	5
2,75	0,343807	0,085951754	474,7034643	0,347428297	0,086857074	479,7034643	0,0103742	5
3	0,339535	0,084883855	152,0914703	0,350697633	0,087674408	157,0914703	0,0319773	5
3,25	0,335263	0,083815957	137,8045529	0,347428297	0,086857074	142,8045529	0,0348486	5
3,5	0,331642	0,082910637	210,0898199	0,339535422	0,084883855	215,0898199	0,0226114	5
3,75	0,329222	0,082305721	680,3072416	0,331642546	0,082910637	685,3072416	0,0069318	5
4	0,328373	0,082093303	0	0,328373211	0,082093303	0	0	5

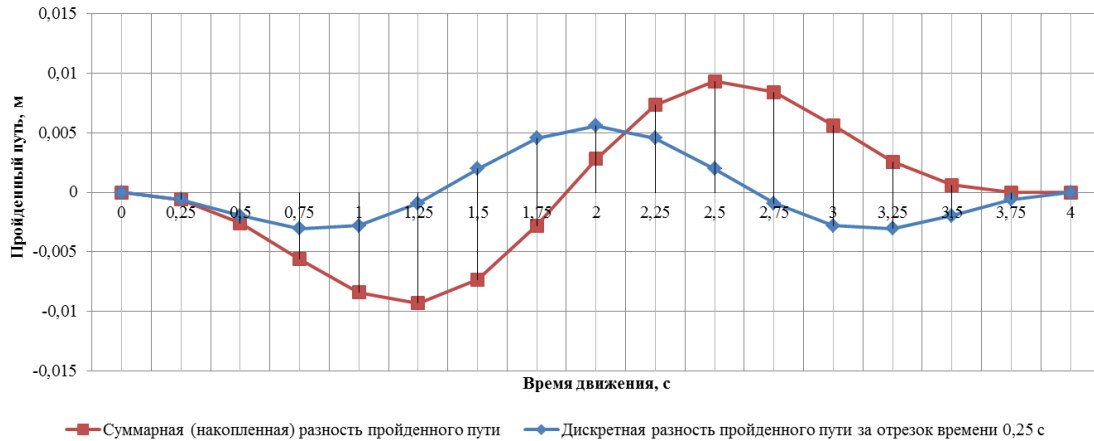


Рис. 7. Графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси



Рис. 8. График изменения угла поворота машины во времени

## 6. Третий этап исследования

Функции изменения коэффициента сопротивления движению грунта во времени на третьем этапе определяются выражениями

$$\mu_{f1}(t) = 0,02 \cos\left(\frac{90\pi t}{180}\right) + 0,125,$$

$$\mu_{f2}(t) = -0,02 \cos\left(\frac{90\pi t}{180}\right) + 0,085.$$

Графическое изображение данных функций представлено на рис. 9.

Полный период каждой функции составляет 4 секунды. Функции сходятся в момент времени, соответствующий двум секундам, величина коэффициента сопротивления

движению грунта в этот момент соответствует его медианному значению для полного интервала – 0,105.

Результаты тягового расчета (в толкающем режиме) представлены в табл. 5.

Графическая интерпретация разности скоростей движения тяговых контуров показана на рис. 10.

Результаты расчетов геометрических параметров позиционирования шасси приведены в табл. 6.

На рис. 11 показаны графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси. На рис. 12 – график изменения угла поворота машины во времени.



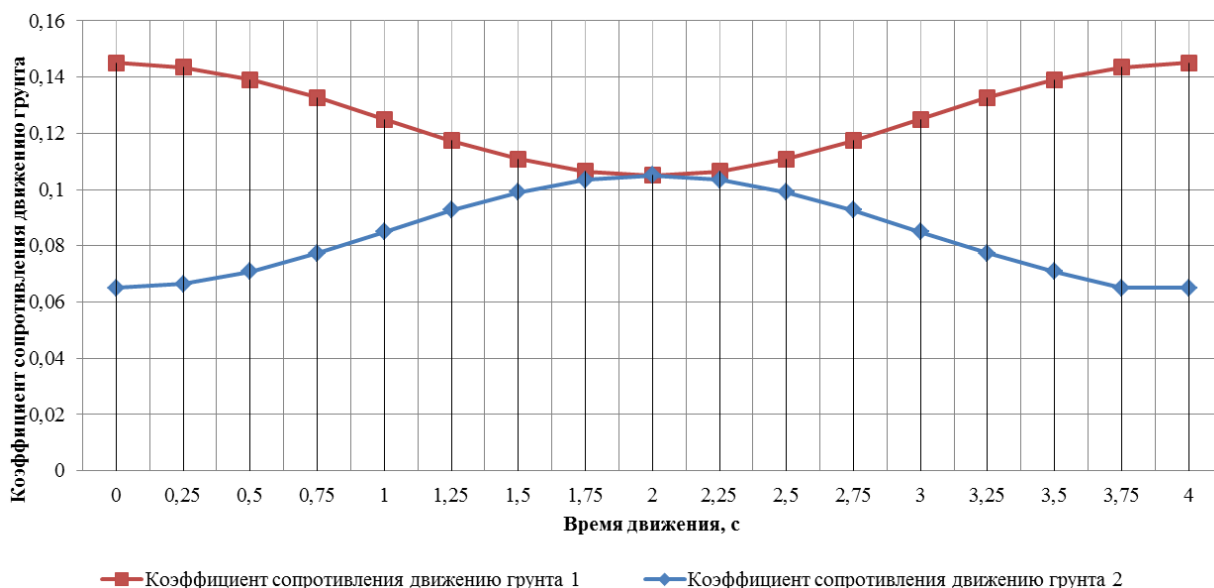


Рис. 9. Графики изменения коэффициента  $\mu_f$  во времени

Таблица 5

Результаты тягового расчета гусеничных контуров в толкающем режиме

Время $t$ , с	$\mu_f$	$S_{min1}$ , Н	$S_{max1}$ , Н	$F_{max1}$ , Н	$v_1$ , м/с	$\mu_f$	$S_{min2}$ , Н	$S_{max2}$ , Н	$F_{max2}$ , Н	$v_2$ , м/с
0	0,145	12500	65804,04	53304,04	0,328373	0,065	12500	49190,39	36690,39	0,350697
0,25	0,143477	12500	65487,88	52987,88	0,328798	0,066522	12500	49506,55	37006,55	0,350272
0,5	0,139142	12500	64587,53	52087,53	0,330007	0,070858	12500	50406,90	37906,90	0,349062
0,75	0,132653	12500	63240,07	50740,07	0,331818	0,077346	12500	51754,36	39254,36	0,347252
1	0,125	12500	61650,62	49150,62	0,333954	0,085	12500	53343,80	40843,80	0,345116
1,25	0,117346	12500	60061,18	47561,18	0,336090	0,092654	12500	54933,24	42433,24	0,342980
1,5	0,110857	12500	58713,72	46213,72	0,337900	0,099142	12500	56280,71	43780,71	0,341170
1,75	0,106522	12500	57813,37	45313,37	0,339110	0,103478	12500	57181,05	44681,05	0,339960
2	0,105	12500	57497,21	44997,21	0,339535	0,105	12500	57497,21	44997,21	0,339535
2,25	0,106522	12500	57813,37	45313,37	0,339110	0,103478	12500	57181,05	44681,05	0,339960
2,5	0,110857	12500	58713,72	46213,72	0,337900	0,099142	12500	56280,71	43780,71	0,341170
2,75	0,117346	12500	60061,18	47561,18	0,336090	0,092654	12500	54933,24	42433,24	0,342980
3	0,125	12500	61650,62	49150,62	0,333954	0,085	12500	53343,80	40843,80	0,345116
3,25	0,132653	12500	63240,07	50740,07	0,331818	0,077346	12500	51754,36	39254,36	0,347252
3,5	0,139142	12500	64587,53	52087,53	0,330007	0,070858	12500	50406,90	37906,90	0,349062
3,75	0,143477	12500	65487,88	52987,88	0,328798	0,065	12500	49506,55	37006,55	0,350272
4	0,145	12500	65804,04	53304,04	0,328373	0,065	12500	49190,39	36690,39	0,350697



Рис. 10. Графики изменения скоростей движения контуров во времени

Таблица 6

Расчетные значения параметров движения для построения траекторий

Время $t$ , с	$v_1$ , м/с	$L_1$ , м	$R_1$ , м	$v_2$ , м/с	$L_2$ , м	$R_2$ , м	$\alpha$ , град	$b$ , м
0	0,328373	0,082093303	73,54573514	0,350697	0,087674408	78,54573514	0,063954759	5
0,25	0,328798	0,082199512	76,55457057	0,350272	0,087568199	81,55457057	0,061520626	5
0,5	0,330007	0,08250197	86,59312057	0,349062	0,087265741	91,59312057	0,054588801	5
0,75	0,331818	0,08295463	107,4973188	0,347252	0,086813081	112,4973188	0,044214593	5
1	0,333954	0,083488579	149,5914703	0,345116	0,086279132	154,5914703	0,03197738	5
1,25	0,336090	0,084022528	243,8751635	0,342980	0,085745183	248,8751635	0,019740166	5
1,5	0,337900	0,084475188	516,7727605	0,341170	0,085292522	521,7727605	0,009365958	5
1,75	0,339110	0,084777646	1995,536471	0,339960	0,084990065	2000,536471	0,002434133	5
2	0,339535	0,084883855	0	0,339535	0,084883855	0	0	5
2,25	0,339110	0,084777646	1995,536473	0,339960	0,084990065	2000,536473	0,002434133	5
2,5	0,337900	0,084475188	516,7727607	0,341170	0,085292522	521,7727607	0,009365958	5
2,75	0,336090	0,084022528	243,8751635	0,342980	0,085745183	248,8751635	0,019740166	5
3	0,333954	0,083488579	149,5914703	0,345116	0,086279132	154,5914703	0,031977379	5
3,25	0,331818	0,08295463	107,4973188	0,347252	0,086813081	112,4973188	0,044214593	5
3,5	0,330007	0,08250197	86,59312057	0,349062	0,087265741	91,59312057	0,054588801	5
3,75	0,328798	0,082199512	76,55457058	0,350272	0,087568199	81,55457058	0,061520626	5
4	0,328373	0,082093303	73,54573514	0,350697	0,087674408	78,54573514	0,063954759	5

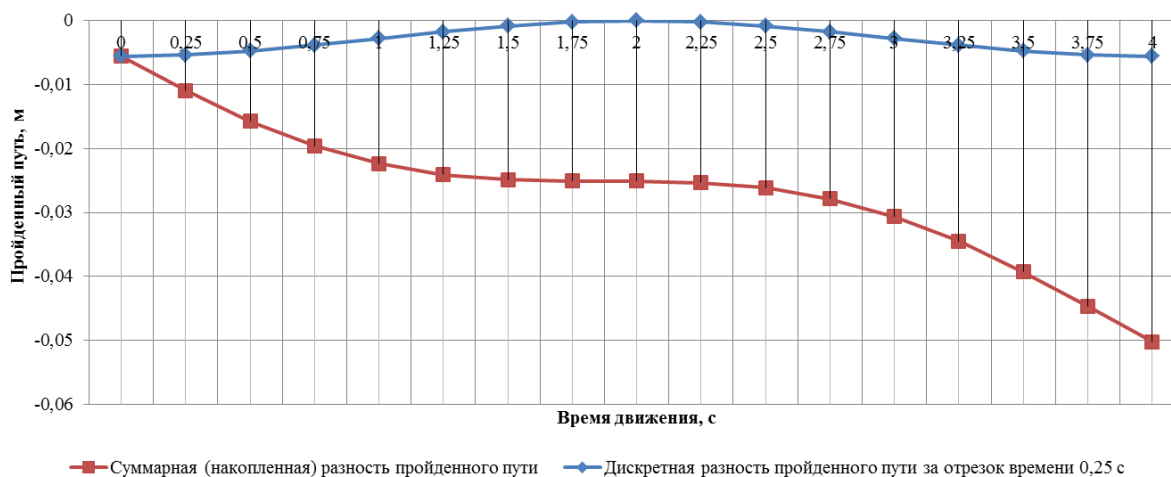


Рис. 11. Графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси

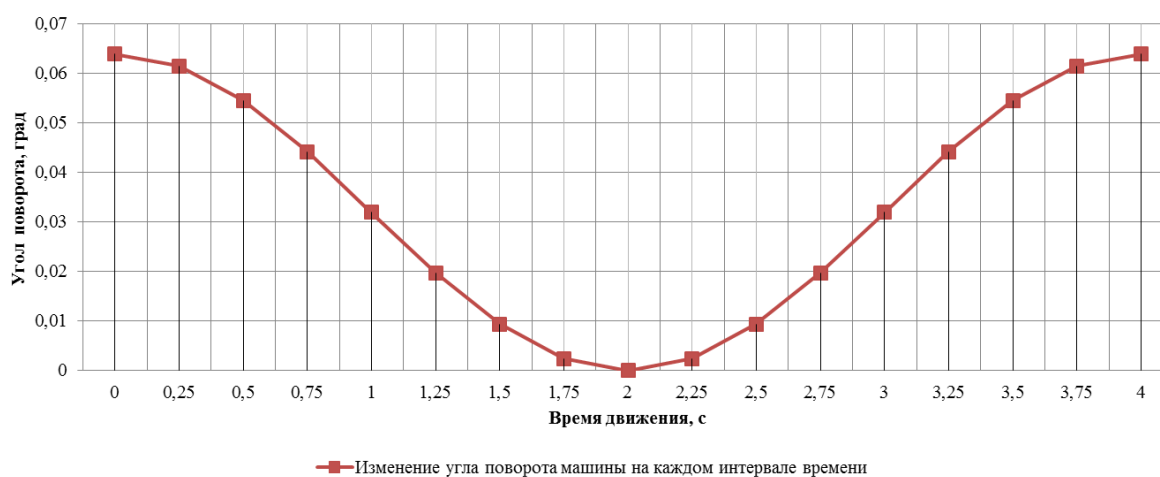


Рис. 12. График изменения угла поворота машины во времени

## 7. Результаты исследования

Анализируя полученные данные можно сделать следующие общие выводы:

1) максимальная разность пройденного пути контурами гусеничного шасси в результате неравномерного воздействия коэффициента сопротивления движению грунта на первом этапе составила примерно 4,4 мм; на втором этапе – 9,5 мм; на третьем этапе – 50 мм; значительный отрыв результата третьего этапа позволяет сделать следующий вывод: *циклическое изменение коэффициента сопротивления грунта во всем возможно диапазоне значений попеременно под каждой гусеницей незначительно влияет на изменение положения машины – гораздо более опасной является ситуация, в которой ко-*

*эффициенты сопротивления для каждой гусеницы постоянно находятся в разных эшелонах одного диапазона, что соответствует работе гусениц на стыке двух типов грунтов;*

2) следует отметить, что забегание одной гусеницы на величину 50 мм по отношению к другой в течение четырех секунд значительно превышает погрешности систем лазерного нивелирования, составляющие 10 – 20 мм; в реальных условиях полученный результат приводит к мгновенному управляющему воздействию системы нивелирования для исправления отклонения в следящем режиме работы;

3) применение в исследовании полного интервала изменения коэффициента сопротивления движению согласно [3] значитель-

но влияет на изменение тяговых усилий в каждом гусеничном контуре и на вариативность скоростей движения в соответствии с видом механических характеристик при тяговом расчете [4]; при этом можно предположить, что в случае отклонения механических характеристик электродвигателей гусеничных контуров возможны сочетания, при которых параметры изменения положения машины примут еще более весомые значения [5, 6].

4) максимальный угол разворота машины по отношению к исходному положению составляет на первом этапе исследования примерно  $0,016^\circ$ , на втором этапе –  $0,064^\circ$ , на третьем этапе –  $0,064^\circ$ ; отсутствие кратных изменений величины угла поворота по аналогии с кратным увеличением забегания объясняется одновременным (вместе с забеганием) кратным увеличением мгновенных радиусов поворота гусениц, что приводит к примерному сохранению соотношений углов поворота на разных этапах исследования; дополнительно стоит указать, что максимальные значения углов поворота во втором и третьем исследованиях соответствуют временным отрезкам, на которых коэффициенты сопротивления движению грунта нахо-

дились в противофазе и принимали, соответственно, максимально и минимально возможные значения.

## 8. Заключение

Проведенное в настоящей статье исследование наглядно демонстрирует влияние случайных факторов при движении гусеничной машины (коэффициента сопротивления движению грунта) на её положение в пространстве. В определенных сочетаниях коэффициентов сопротивления под разными гусеницами величины отклонений положения машины могут значительно превышать заявленные производителями погрешности точности систем позиционирования, реагирующие в следящем режиме и восстанавливающие заданную траекторию её движения.

Дальнейшее изучение внутренних факторов, влияющих на совместную работу гусеничных движителей в одном шасси, и создание математического описания протекающих при этом процессов позволит разрабатывать принципиально новые управляющие алгоритмы систем позиционирования на основе программного управления данным процессом.

## Список литературы

1. Марковнина А.И., Кривов А.В., Макаров В.С., Беляков В.В. Системы позиционирования для экскаваторной техники // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Брянск, 01–02 октября 2020 года. Брянск: Брянский государственный технический университет, 2020. С.37-46.

2. Гончаров К.А. Моделирование распределения усилий в тяговых контурах гусеничных движителей в условиях переменности сопротивления движению грунтов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2023. №2. С. 127–133. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-02-127-133.

3. Гончаров К.А. Инверсионный подход к тяговому расчету гусеничных движителей подъемно-транспортных, строительных и

## References

1. Morkovnina A.I., Krivov A.V., Makarov V.S., Belyakov V.V. *Sistemy pozitsionirovaniya dlya ekskavatornoy tekhniki // Innovatsionnoe razvitie podemno-transportnoy tekhniki: Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Bryansk, 01-02 oktyabrya 2020 goda. Bryansk, Bryanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet, 2020, pp. 37-46. (In Russian)*

2. Goncharov K.A. Simulation of distribution of forces in traction circuit tracked chassis under conditions of variability ground resistance. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2023, No.2, pp. 127-133. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-02-127-133 (In Russian)*

3. Goncharov K.A. Inversion approach to traction calculation of tracked chassis of hoisting, construction, and road machines.

дорожных машин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2022. №2. С. 94–102. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-94-102.

4. Гончаров К.А. Совершенствование тягового расчета многоприводных ленточных конвейеров с учетом механических характеристик приводов // Подъемно-транспортное дело, 2011. №4. С. 2–5.

5. Гончаров К.А., Дунаев В.П. Комплексный подход к тяговому расчету ленточных конвейеров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2018. №2. С. 144–151.

6. Гончаров К. А. Тяговый расчет многоприводных ленточных конвейеров. Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2021. 271 с.

*Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2022, No.2, pp. 94-102. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-94-102 (In Russian)*

4. Goncharov K.A. Improving the calculation of traction of multi-drive belt conveyors taking into account the mechanical characteristics of drives. *Podemno-transportnoe delo*, 2011, No.4, pp. 2-5. (In Russian)

5. Goncharov K.A., Dunaev V.P. The integrated approach to traction calculation of belt conveyors. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No.2, pp. 144-151. (In Russian)

6. Goncharov K.A. *Tyagovyy raschet mnogoprivodnykh lentochnykh konveyerov* [Traction calculation of multi-drive belt conveyor]. Kursk, ZAO Universitetskaya kniga, 2021. 271 p. (In Russian)