

УДК (UDC) 621.86

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОТКЛОНЕНИЯ  
ПОЛОЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНЫХ ШАССИ В ДВИЖЕНИИ  
ПРИ ПЕРЕМЕННОМ СОПРОТИВЛЕНИИ ГРУНТАMATHEMATICAL DESCRIPTION OF DEVIATION MECHANISMS  
POSITIONS OF TRACK CHASSIS IN MOTION  
WITH VARIABLE 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.** Инженерные методики проектирования гусеничных механизмов передвижения мобильных шасси подъемно-транспортных, строительных, дорожных и других специализированных машин опираются на постоянные значения коэффициентов сопротивления движению грунта при выборе мощности двигателей и параметров гусеничных лент. В реальности грунт не является однородным, а коэффициент сопротивления движению в каждый момент времени является случайной величиной, находящейся в определенном интервале в зависимости от типа грунта. В данной статье предлагается математическое описание процесса совместного движения двух гусеничных контуров в рамках одного шасси при неравномерном во времени сопротивлении грунта, что отражается на скорости движения каждого контура и приводит к эффекту забегания гусениц, способствующему возникновению мгновенных поворотных моментов. В зависимости от вида подбираемого закона изменения коэффициента сопротивления движению грунта во времени показаны результаты декомпенсации неравномерности движения гусениц, не зависящие от возникающего дополнительного сопротивления от бокового среза слоя грунта при мгновенных поворотах шасси, характерные для механизмов с отдельным приводом каждого гусеничного контура.

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

**Дата получения статьи:** 28.06.2023  
**Дата принятия к публикации:** 15.09.2023  
**Дата публикации:** 25.09.2023

**Сведения об авторах:**

**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.** Engineering methods for designing tracked mechanisms for moving mobile chassis of hoisting and transport, construction, road and other specialized machines are based on constant values of the coefficients of resistance to ground movement when choosing engine power and track parameters. In reality, the ground is not homogeneous, and the coefficient of resistance to movement at each moment in time is a random variable located in a certain interval depending on the type of ground. This article proposes a mathematical description of the process of joint movement of two tracked circuits within the same chassis with uneven ground resistance over time, which is reflected in the speed of movement of each circuit and leads to the effect of running tracks, which contributes to the occurrence of instantaneous turning moments. Depending on the type of selected law of change in the coefficient of resistance to ground movement over time, the results of decompensation of uneven movement of the tracks are shown, independent of the additional resistance arising from the lateral cut of the ground layer during instantaneous rotations of the chassis, characteristic of mechanisms with a separate drive of each track circuit.

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

**Date of manuscript reception:** 28.06.2023  
**Date of acceptance for publication:** 15.09.2023  
**Date of publication:** 25.09.2023

**Authors' information:**

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

В исследовании [1] установлен ряд факторов, не учитываемых при выборе расчетного значения коэффициента сопротивления движению грунта, в частности, неравномерность распределения свойств по всему грунтовому пласту, в результате чего коэффициент сопротивления движению в каждый момент времени представляет собой случайную величину, находящуюся в определенном интервале, соответствующем типу грунта. В случае проведения проектного расчета с целью выбора основных механических параметров и элементов гусеничного движителя пренебрежение случайной природой коэффициента сопротивления движению грунта оправдано и не приводит к негативным последствиям на стадии эксплуатации готовой машины. При этом учет неравномерности движения в случае выбора элементов привода (что особенно актуально для контуров с раздельным приводом), систем управления приводами может сыграть важную роль, заключающуюся в уточнении параметров циклов переменных напряжений при проведении усталостного расчета элементов привода, подборе режимов работы систем управления, повышении эффективности системы эксплуатации машины.

Отдельно стоит отметить процессы формирования физических механизмов компенсации забегания гусеничных контуров при неравномерности их скоростей движения. Классическим механизмом выравнивания скоростей в случае раздельного привода с применением электродвигателей является повышение сопротивления движению забегавшей гусеницы за счет начала процесса срезания пласта грунта данной гусеницей (по аналогии с наездом реборды кранового колеса на рельс). В результате происходит снижение скорости движения донагруженной гусеницы в соответствии с видом механической характеристики привода.

При этом гусеничные движители способны осуществлять выравнивание скоростей

движения без бокового среза грунта. Однако данный процесс является случайным и зависит от значения коэффициента сопротивления движению грунта под каждой из гусениц в конкретный момент времени. Подобная «случайная» компенсация может вносить неконтролируемые изменения в процесс управления машиной, особенно при смешанном составе грунта.

С учетом возможных отклонений механических характеристик электродвигателей приводов [2] математическое описание механизмов отклонения положения гусеничных шасси в движении при переменном сопротивлении грунта позволит устанавливать теоретические закономерности процесса движения гусеничных шасси разных конфигураций. Указанные теоретические закономерности, в свою очередь, позволят формировать взвешенные подходы к дифференцированному выбору мощности двигателей (с частичным или полным учетом сопротивления от бокового среза грунта) и подбору механического оборудования шасси при создании универсальных линеек машин для работ на разных типах грунтов при максимально возможной унификации узлов.

## 2. Цель исследования

Целью настоящего исследования является создание математического описания механизмов отклонения положения гусеничных шасси в движении при переменном значении коэффициента сопротивления грунта. Результат применения разрабатываемого математического описания должен выражаться в создании дискретизированной по времени модели свободной траектории движения гусеничного шасси, зависящей только от вида закона изменения коэффициента сопротивления движению грунта (без учета сопротивления от бокового среза, изменения натяжения гусеничной ленты).

### 3. Особенности моделирования

Предлагаемое в настоящей статье математическое описание совместимо с зависимостями, приведенными в работах [1, 3].

Представим коэффициент сопротивления движению от грунта  $\mu_f$  в виде периодической функции времени, амплитуда которой всегда будет находиться в диапазонах изменения  $\mu_f$  в соответствии с типом исследуемого грунта.

Выбор периодической функции в качестве базовой для моделирования изменения коэффициента сопротивления движению во времени обосновывается следующими аргументами:

1. Периодическая функция (в частности,  $\sin(x)$ ,  $\cos(x)$ ) является бесконечной и непрерывной по оси абсцисс, что в процессе моделирования снимает ограничения на длину интервалов времени исследования сопутствующих процессов.

2. Периодические тригонометрические функции хорошо поддаются манипуляциям с преобразованием амплитуды и периода колебаний, что позволяет удобно управлять данными параметрами для создания на определенных отрезках времени различных конфигураций данных функций.

В общем случае коэффициент  $\mu_f$  опишем функцией вида

$$\mu_f(t) = A \cos\left(\frac{B\pi t}{180}\right) + m, \quad (1)$$

где  $A$  – коэффициент, определяющий амплитуду колебаний коэффициента  $\mu_f$  в принятом интервале его значений;  $B$  – коэффициент преобразования аргумента с целью определения вида функции в пределах установленного интервала;  $m$  – медианное значение коэффициента сопротивления движению грунта.

Коэффициент  $A$  определяется следующим выражением

$$A = \frac{\mu_{f2} - \mu_{f1}}{2},$$

где  $\mu_{f2}$  – наибольшее граничное значение коэффициента сопротивления движению в выбранном интервале для соответствующего типа грунта;  $\mu_{f1}$  – наименьшее граничное значение коэффициента сопротивления движению в выбранном интервале.

Величина  $m$  определяется зависимостью

$$m = \mu_{f1} + A.$$

Коэффициент  $B$  выбирается в зависимости от необходимого вида функции в конкретный период времени. В настоящем исследовании величину коэффициента  $B$  будем принимать равной значениям углов, используемых в качестве аргумента тригонометрических функций.

Скорость движения гусеничного шасси в каждый момент времени определим с учетом внешнего вида рабочей ветви механической характеристики электропривода, приведенной к точке на делительной окружности приводной звездочки

$$v(t) = \frac{C - F_{\text{тяги}}(t)}{-k}, \quad (2)$$

где  $C$ ,  $k$  – коэффициенты, определяющие вид рабочей ветви механической характеристики привода;  $F_{\text{тяги}}(t)$  – тяговое усилие, реализуемое каким-либо гусеничным контуром в конкретный момент времени, определяется в результате процедуры тягового расчета с использованием зависимостей, приведенных в работах [1, 3].

Построение траекторий движения гусениц в результате постоянного изменения скоростей движения контуров осуществим дискретно на основе сопоставления длин пройденных путей каждой гусеницы за определенный интервал времени с разными скоростями при условии попадания длин этих путей в качестве частей соответствующих дуг окружности в один сектор с расстоянием между дугами, соответствующим колее гусеничного шасси  $b$  (рис. 1).

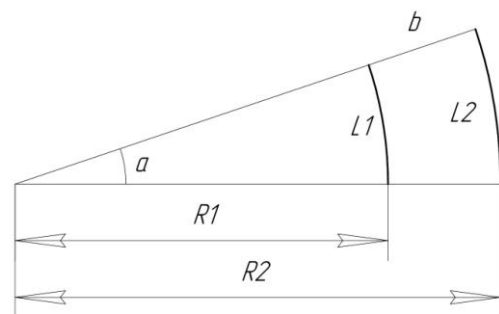


Рис. 1. Схема к расчету траекторий

Таким образом, в результате каждой итерации моделирования последовательно определяются скорости движения гусениц и

соответствующие пройденные ими расстояния  $L_1$  и  $L_2$ . При постоянном значении колеи гусениц  $b$  величины радиусов движения гусениц  $R_1$  и  $R_2$  определяются зависимостями

$$R_1 = \frac{bL_1}{L_2 - L_1}, \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{bL_1}{L_2 - L_1} + b. \quad (4)$$

Накопленное смещение той или иной гусеницы целесообразно определять графически из общей диаграммы построения траектории движения (рис. 2).

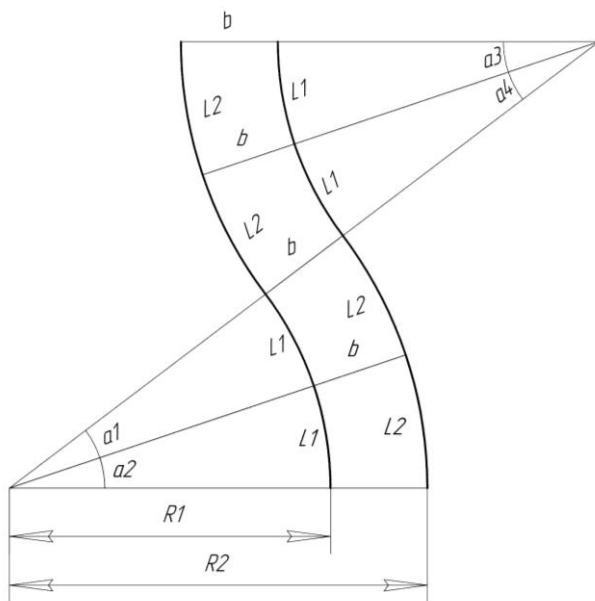


Рис. 2. Обобщенная схема составления диаграммы траекторий движения гусениц

#### 4. Анализ результатов моделирования

Оценим влияние переменности коэффициента сопротивления движению грунта на свободное (без учета бокового среза грунта) смещение гусеничного шасси.

Для построения элементов диаграммы перемещения гусеничного шасси, описание технических характеристик которого представлено в работах [1, 3], введем дополнительные параметры:

– номинальная скорость движения, развиваемая приводом и реализуемая для шасси, при номинальной нагрузке – 0,35 м/с;

– скорость движения шасси, соответствующая синхронной частоте вращения электродвигателя, в случае отсутствия нагрузки – 0,4 м/с;

– тип грунта, по которому движется машина – асфальт и бетон ( $\mu_{f2} = 0,07$ ;  $\mu_{f1} = 0,065$ ).

Величина амплитуды изменения коэффициента сопротивления движению

$$A = \frac{\mu_{f2} - \mu_{f1}}{2} = \frac{0,07 - 0,065}{2} = 0,0025.$$

Медианное значение коэффициента сопротивления движению

$$m = \mu_{f1} + A = 0,065 + 0,0025 = 0,0675.$$

Значение коэффициента  $B$  для первой гусеницы ( $B_1$ ) примем равным 90, что соответствует периоду изменения  $\mu_f$  – 4 секунды. Для второй гусеницы примем  $B_2 = 100$  (период изменения  $\mu_f$  – 3,6 секунды). Таким образом, функции изменения коэффициента сопротивления движению грунта во времени примут вид

$$\mu_{f1}(t) = 0,0025 \cos\left(\frac{90\pi t}{180}\right) + 0,0675,$$

$$\mu_{f2}(t) = 0,0025 \cos\left(\frac{100\pi t}{180}\right) + 0,0675.$$

Графический вид данных функций представлен на рис. 3.

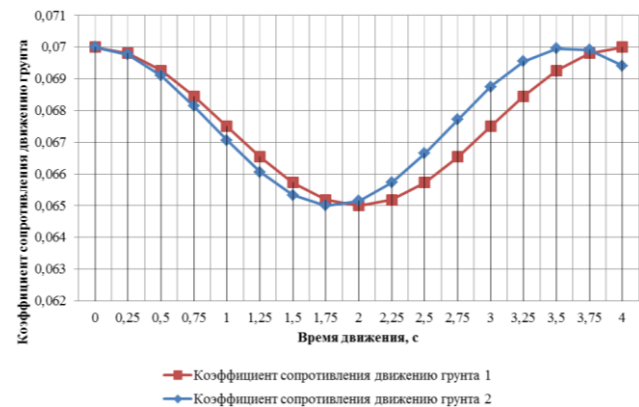


Рис. 3. Графики изменения коэффициента  $\mu_f$  во времени

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



Таблица 1

## Результаты тягового расчета гусеничных контуров в толкающем режиме

Время $t$ , с	$\mu_1$	$S_{\min 1}$ , Н	$S_{\max 1}$ , Н	$F_{\text{мяз}1}$ , Н	$v_1$ , м/с	$\mu_2$	$S_{\min 2}$ , Н	$S_{\max 2}$ , Н	$F_{\text{мяз}2}$ , Н	$v_2$ , м/с
0	0,07	12500	50228,75	37728,75	0,349302	0,07	12500	50228,75	37728,75	0,349302
0,25	0,069809	12500	50189,23	37689,23	0,349355	0,069765	12500	50180,10	37680,10	0,349367
0,5	0,069267	12500	50076,68	37576,68	0,349506	0,069106	12500	50043,29	37543,29	0,349551
0,75	0,068456	12500	49908,25	37408,25	0,349733	0,068147	12500	49843,94	37343,94	0,349819
1	0,0675	12500	49709,57	37209,57	0,349999	0,067065	12500	49619,41	37119,41	0,350121
1,25	0,066543	12500	49510,89	37010,89	0,350266	0,066066	12500	49411,78	36911,78	0,350400
1,5	0,065732	12500	49342,46	36842,46	0,350493	0,065334	12500	49259,95	36759,95	0,350604
1,75	0,065190	12500	49229,91	36729,91	0,350644	0,065009	12500	49192,37	36692,37	0,350694
2	0,065	12500	49190,39	36690,39	0,350697	0,065150	12500	49221,70	36721,70	0,350655
2,25	0,065190	12500	49229,91	36729,91	0,350644	0,065732	12500	49342,46	36842,46	0,350493
2,5	0,065732	12500	49342,46	36842,46	0,350493	0,066644	12500	49532,00	37032,00	0,350238
2,75	0,066543	12500	49510,89	37010,89	0,350266	0,067717	12500	49754,82	37254,82	0,349939
3	0,0675	12500	49709,57	37209,57	0,349999	0,06875	12500	49969,16	37469,16	0,349651
3,25	0,068456	12500	49908,25	37408,25	0,349733	0,069547	12500	50134,85	37634,85	0,349428
3,5	0,069267	12500	50076,68	37576,68	0,349506	0,069962	12500	50220,86	37720,86	0,349312
3,75	0,069809	12500	50189,23	37689,23	0,349355	0,069914	12500	50211,05	37711,05	0,349326
4	0,07	12500	50228,75	37728,75	0,349302	0,069415	12500	50107,28	37607,28	0,349465

Коэффициенты  $C$  и  $k$  механической характеристики привода вычислим исходя из условия, что прямая характеристики проходит через две точки:

– в первой точке тяговое усилие равно 0 при скорости движения 0,4 м/с, соответствующей синхронной частоте вращения электродвигателя;

– во второй точке тяговое усилие соответствует медианному значению коэффициента сопротивления движению грунта (0,0675) и составляет 37209,57 Н (табл. 1); номинальную скорость движения в данной точке примем равной 0,35 м/с.

Приведенные выше упрощения целесообразно применять при неизвестных параметрах приводов. В противном случае необходимо отталкиваться от реальных механических характеристик электродвигателей.

С учетом принятых значений коэффициенты  $C$  и  $k$  механической характеристики определяются решением системы уравнений

$$\begin{cases} 0 = k \cdot 0,4 + C; \\ 37209,57 = k \cdot 0,35 + C. \end{cases}$$

В результате решения системы получим  $k = -744191,4$ ;  $C = 297676,56$ .

Последовательно подставляя в зависимость (2) значения тяговых усилий, представленных в табл. 1, с учетом коэффициентов  $k$  и  $C$  получим величины скоростей гусеничных контуров (внесем в табл. 1 в соответствующие столбцы).

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



Рис. 4. Графики изменения скоростей движения контуров во времени

Параметры  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ , необходимые для построения траектории движения машины, представлены в табл. 2.

Величины  $L_1$  и  $L_2$  для каждого отрезка времени (в соответствии с данными табл. 1) определим следующим образом:

$$L_1 = v_1 t_i ; L_2 = v_2 t_i .$$

Расчетное значение величины  $b$  (колеи гусеничного шасси) примем равным 5000 мм. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

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	0,349302	0,087325589	0	0,349302	0,087325589	0	0	5
0,25	0,349355	0,087338865	142492,62	0,349367	0,08734193	142497,62	0,000035118	5
0,5	0,349506	0,087376672	38945,27	0,349551	0,08738789	38950,27	0,000128547	5
0,75	0,349733	0,087433255	20236,24	0,349819	0,087454858	20241,24	0,000247554	5
1	0,067065	0,087499999	14445,66	0,350121	0,087530285	14450,66	0,000347051	5
1,25	0,066066	0,087566742	13150,70	0,350400	0,087600036	13155,70	0,000381516	5
1,5	0,065334	0,087623325	15806,82	0,350604	0,087651042	15811,82	0,000317613	5
1,75	0,065009	0,087661132	34751,81	0,350694	0,087673745	34756,81	0,000144528	5
2	0,065150	0,087674408	-41677,54	0,350655	0,08766389	-41672,54	-0,00012052	5
2,25	0,065732	0,087661132	-11593,16	0,350493	0,087623325	-11588,16	-0,00043323	5
2,5	0,066644	0,087623325	-6880,55	0,350238	0,08755965	-6875,55	-0,00072965	5
2,75	0,067717	0,087566742	-5343,05	0,349939	0,087484798	-5338,05	-0,00093901	5
3	0,06875	0,087499999	-5016,92	0,349651	0,087412794	-5011,92	-0,00099929	5
3,25	0,069547	0,087433255	-5742,79	0,349428	0,087357131	-5737,79	-0,00087232	5
3,5	0,069962	0,087376672	-9020,23	0,349312	0,087328239	-9015,23	-0,00055500	5
3,75	0,069914	0,087338865	-59549,69	0,349326	0,087331532	-59544,69	-0,0000840	5
4	0,069415	0,087325589	10700,59	0,349465	0,087366393	10705,59	0,00046758	5

С учетом значительных полученных величин радиусов поворота машины привести полную масштабную диаграмму движения в соответствии с рис. 2 не представляется возможным. В данном случае целесообразно представить промежуточный результат в

сравнительной постановке для двух контуров. На рис. 5 показаны графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси. На рис. 6 – график изменения угла поворота машины во времени.

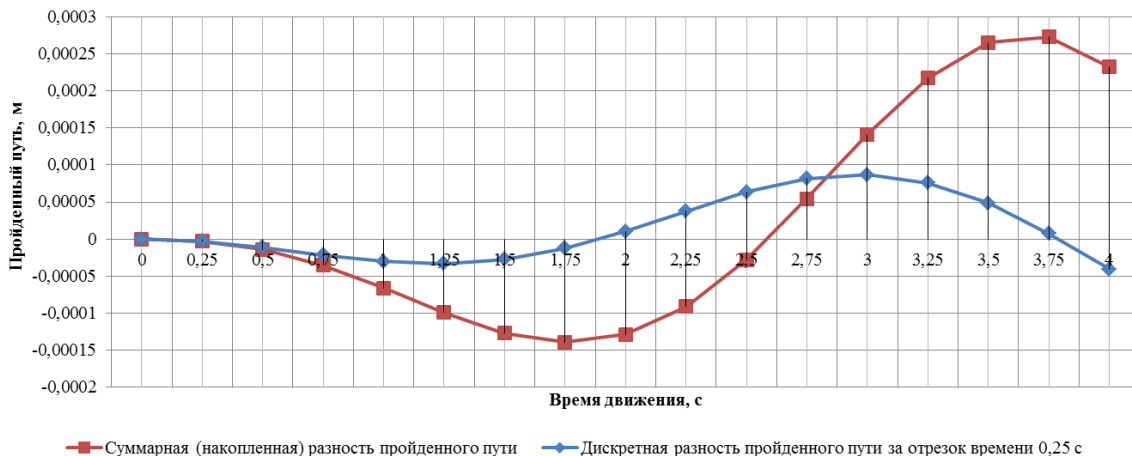


Рис. 5. Графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси

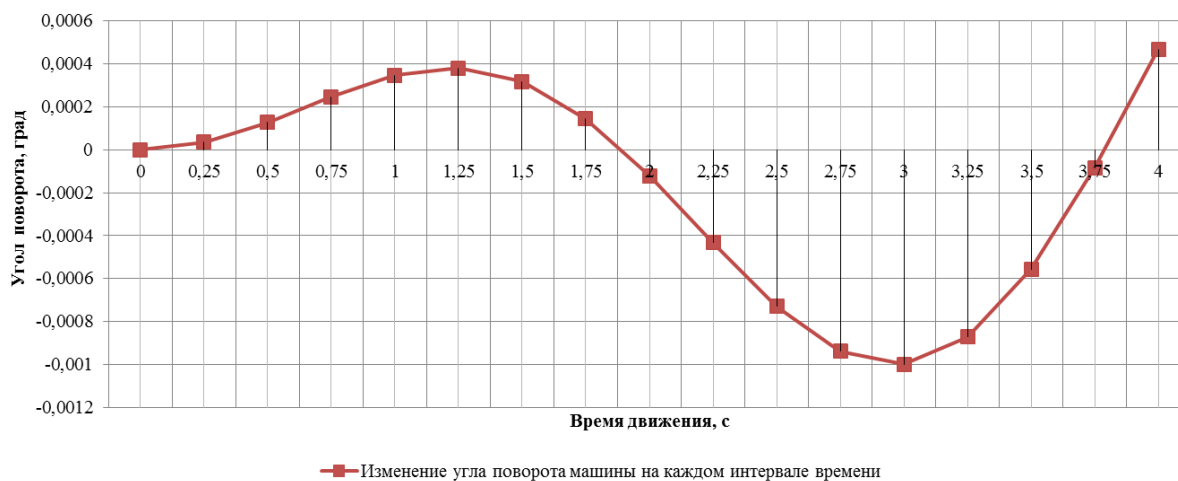


Рис. 6. График изменения угла поворота машины во времени

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие общие выводы:

1) максимальная разность пройденного пути контурами гусеничного шасси в результате неравномерного воздействия коэффициента сопротивления движению грунта составила примерно 0,27 мм;

2) полученное значение разности пройденного пути (0,27 мм) сравнительно велико, если вернуться к начальным условиям моделирования, характеризующимся самым маленьким значением коэффициента сопротивления движению (асфальт и бетон), а также самым маленьким интервалом его изменения (0,005); к примеру, при переходе с асфальта на неукатанную грязную или проселочную дорогу коэффициент сопротивления движению грунта может изменяться в диапазоне 0,065...0,145 [1], что составляет отрезок, соответствующий 0,08, превышающий предыдущий интервал в 16 раз (даже без учетакратно возрастающих тяговых усилий, определяющих значительное количество параметров гусеничного шасси [4]);

3) максимальный угол разворота машины по отношению к исходному положению составляет примерно 0,001°, что может количественно характеризовать эффект «стягивания» машины в сторону; компенсация «стягивания», как правило, производится ручным управлением оператора;

4) при моделировании не учитывалось возможное отклонение механических характеристик электродвигателей приводов [5],

что в большинстве случаев приводит к значительным отклонениям тяговых усилий [6];

5) стоит отметить, что выбор законов изменения величин коэффициентов сопротивления движению грунта для каждой гусеницы, а также их сопоставление друг с другом имеет большое значение в процессе проектирования машины и проектного исследования особенностей её работы на различных типах грунтов, т.к. частое попадание противоположно резонирующих значений коэффициента с уклоном в какую-либо одну сторону может приводить к системному изменению положения машины при движении; в проведенном исследовании период изучения изменений составил 4 секунды, в конце которого разница в пройденном гусеницами расстоянии составила 0,27 мм; с учетом эффекта накопления через 20 секунд возможная разница (в зависимости от совпадения законов) может составить примерно 1,5 мм, что значительно влияет на выравнивание машины в пространстве, особенно при её участии в проведении планировочных работ местности с использованием систем управления с лазерным позиционированием;

6) в контексте применения гусеничных шасси в структуре мобильных канатных дорог позиционирование машины при движении и выравнивание приводами её положения в случае «сползания» пластов грунта под гусеницами также очень важно, т.к. любые отклонения положения мгновенно отражаются на натяжении несущих канатов дороги.

## 5. Заключение.

Приведенное в настоящей статье математическое описание механизмов отклонения положения гусеничных шасси в движении при переменном сопротивлении грунта представляет собой базис для проведения проверочных расчетов при проектировании гусеничных механизмов передвижения. Реализация предложенных зависимостей при расчете в соответствующем проекте позволит получить информацию о возможном поведении одной и той же машины при движе-

нии по грунтам разного типа и выработать комплекс мер реагирования на возможные отклонения от принятых норм эксплуатации.

Полученный результат позволяет установить необходимость проведения дальнейших исследований особенностей движения гусеничных шасси с использованием предложенного в настоящей статье математического аппарата с целью выработки обобщенных рекомендаций по выбору коэффициента сопротивления движению грунта при проектировании, а также поиска наилучших сочетаний законов его изменения.

## Список литературы

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

2 Гончаров К.А. Вероятностный подход к определению отклонений скольжения электродвигателей приводов ленточных конвейеров // Приводы и компоненты машин, 2016. №4-5. С. 13–15.

3 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.

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 / К. А. Гончаров. Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2021. 271 с.

## References

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

2. Goncharov K.A. The probabilistic approach to determining the slide departures of electric motors of belt conveyors. *Machine drives and parts*, 2016, No.4-5, pp. 13-15. (In Russian)

3. Goncharov K.A. Inversion approach to traction calculation of tracked chassis of hoisting, construction, and road machines. *Nauchno-tekhnicheskii 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. *Podyemno-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-tekhnicheskii 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)