

УДК (UDC) 621.86

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНЫХ ШАССИ С ДВУМЯ ДВИЖИТЕЛЯМИ ПРИ ДИАГОНАЛЬНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ПРИВОДОВ

SIMULATION OF RECTILINEAR MOVEMENT OF TRACKED CHASSIS WITH TWO MOVERS WITH DIAGONAL ARRANGEMENT OF DRIVES

Гончаров К.А.¹, Бабич О.В.¹, Поляков П.А.², Панчук М.С.²
Goncharov K.A.¹, Babich O.V.¹, Polyakov P.A.², Panchuk M.S.²¹ – Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)² – Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)¹ – Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)² – Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. Диагональное (перекрестное) расположение приводов гусеничных контуров при компоновке гусеничных шасси с двумя движителями является распространенным решением при проектировании наземных транспортно-технологических средств различного назначения. При прямолинейном движении таких средств один движитель всегда работает в тяговом режиме, другой – в толкающем. В данной статье на основе разработанных ранее математических моделей движения гусеничных шасси при отклонении значений факторов, определяющих закономерности движения машины, выполнен анализ движения гусеничного шасси с двумя движителями и диагональным расположением электропривода при постоянном одинаковом значении коэффициента сопротивления движению от грунта, при его переменном значении для каждого из движителей, а также с учетом возможно отклонения скольжения электродвигателей приводов в рамках регламентированного нормативного интервала. Сформированы рекомендации к процедурам проектирования гусеничных шасси в указанном исполнении и конструктивной реализации размещения электродвигателей между движителями внутри гусеничного шасси.

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

Дата получения статьи: 15.01.2025
Дата принятия к публикации: 02.03.2025
Дата публикации: 25.03.2025

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: <https://orcid.org/0000-0002-5895-1162>

Бабич Оксана Викторовна – доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры экономики и управления ФГБОУ ВО «Брянский государственный

Abstract. The diagonal (cross) arrangement of the drives of the track contours in the layout of the tracked chassis with two movers is a common solution in the design of ground transport and technological vehicles for various purposes. During rectilinear motion of such vehicles, one mover always operates in the traction mode, the other in the pushing mode. In this article, based on previously developed mathematical models of the motion of tracked chassis with deviations in the values of the factors determining the patterns of machine motion, an analysis of the motion of a tracked chassis with two movers and a diagonal arrangement of the electric drive is performed at a constant identical value of the coefficient of resistance to movement from the ground, with its variable value for each of the movers, and also taking into account the possible deviation of the slip of the drive electric motors within the regulated standard interval. Recommendations are formed for the procedures for designing tracked chassis in the specified version and the structural implementation of the placement of electric motors between the movers inside the tracked chassis.

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

Date of manuscript reception: 15.01.2025
Date of acceptance for publication: 02.03.2025
Date of publication: 25.03.2025

Authors' 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: <https://orcid.org/0000-0002-5895-1162>

Oksana V. Babich – Doctor of Economical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Economics and management” at Academician I.G.

университет имени академика И.Г. Петровского»,
e-mail: babichoksana221@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1954-1475>

Поляков Павел Анатольевич – аспирант кафедры «Производство и сервис в транспортном машиностроении» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,
e-mail: poliakov-pavel2012@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4709-5568>

Панчук Максим Сергеевич – аспирант кафедры «Производство и сервис в транспортном машиностроении» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,
e-mail: maksim06091998@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0732-6317>

† Petrovskii Bryansk State University,
e-mail: babichoksana221@mail.ru.

† ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1954-1475>

† **Pavel A. Polyakov** – post-graduate student of the Department “Production and service in transport machine-building” at Bryansk State Technical University,
e-mail: poliakov-pavel2012@yandex.ru.

† ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4709-5568>

† **Maksim S. Panchuk** – post-graduate student of the Department “Production and service in transport machine-building” at Bryansk State Technical University,
e-mail: maksim06091998@gmail.com.

† ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0732-6317>

1. Введение

Движение гусеничных шасси сопровождается воздействием ряда факторов, существенно влияющих на положение движителей в пространстве. В работах [1 – 5] предложен новый подход к исследованию проблемных вопросов движения гусеничных шасси на основе представления гусеничных контуров в виде независимых или функционирующих в жестком соединении друг с другом машин непрерывного транспорта. В частности, в работе [1] описаны особенности указанного подхода в виде инверсии тягового расчета гусеничного движителя при его рассмотрении в качестве машины непрерывного транспорта в противовес принятым ранее представлениям о гусенице, как о бесконечном рельсе, самостоятельно укладываемом при движении машины.

Моделирование совместной работы гусеничных движителей при переменности коэффициента сопротивления движению, проведенное в работе [2], продемонстрировало преимущества предложенного инверсионного подхода в контексте появления возможности анализа силовых процессов, происходящих внутри каждого контура, и их возможного влияния на принятие различных проектных решений: выбор приводных и натяжных устройств, гусеничной ленты, синтез приводных и натяжных звездочек и т.д.

Исследования, результаты которых приведены в работах [3, 4], позволили с определенными упрощениями, заключающимися в дискретности процесса моделирования, описать механизмы отклонения положения гусенич-

ных шасси в движении при переменном сопротивлении грунта, а также теоретически определить основные закономерности поведения гусеничных движителей внутри шасси в случаях, когда кривые, описывающие изменения коэффициента сопротивления движению во времени, для каждого из гусеничных контуров сочетаются случайным образом.

В исследовании, представленном в работе [5], к вышеописанным факторам был добавлен элемент влияния возможного отклонения механических характеристик электродвигателей отдельного привода гусеничных контуров на особенности позиционирования шасси в пространстве.

Исследования [1 – 5] оперировали симметричным односторонним расположением приводов гусеничных контуров, жестко связанных между собой, в результате чего возможное забегание гусениц приводило к мгновенным поворотам всего шасси.

Одной из классических схем расположения приводов в шасси с двумя гусеничными контурами является диагональная компоновка (рис. 1), характеризующаяся одновременным применением разных схем движения для каждого контура: какой-либо из контуров всегда работает в толкающем режиме, а другой – в тяговом режиме [1]. Изменение режима работы в таком случае происходит одновременно для двух контуров при изменении направления движения машины.

В случае применения шарнирной связи между гусеничными контурами (рис. 2) можно добиться исключения мгновенных поворотов всего шасси при относительном незначительном забегании гусениц.

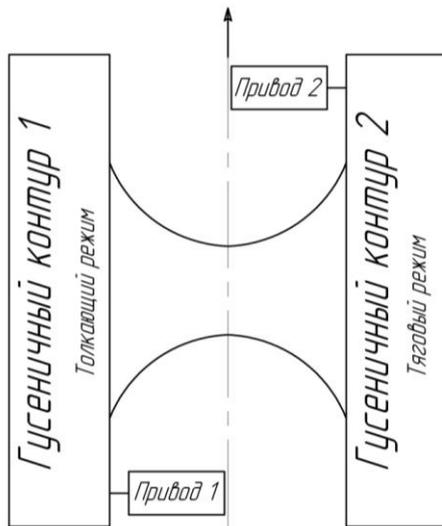


Рис. 1. Диагональная компоновка приводов при жестком соединении гусеничных контуров

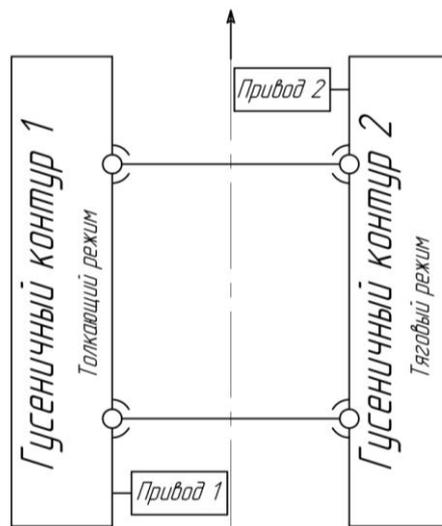


Рис. 2. Диагональная компоновка приводов при шарнирном соединении гусеничных контуров

Тяговый и толкающий режимы работы движителей характеризуются различной картиной распределения натяжений внутри гусеничных контуров [1], что выражается не только в виде различных значений максимального натяжения гусеничных лент, но и в различии тяговых усилий внутри гусеничных контуров за счет сопротивлений, зависящих от натяжения лент.

В случае воздействия на гусеничное шасси с диагональным расположением приводов описанных выше факторов в виде отклонений механических характеристик электродвигателей и случайной природы изменения коэффициента сопротивления движению закономерности его позиционирования в пространстве остаются неизученными и нуждаются в проведении дополнительного исследования.

2. Цель исследования

Целью настоящего исследования является моделирование прямолинейного движения гусеничного шасси, в структуру которого включено два гусеничных контура с диагональной компоновкой приводов, при постоянном значении коэффициента сопротивления движению, при его переменном значении в различных одновременных сочетаниях для каждого из контуров, а также при учете возможных отклонений скольжения электродвигателей приводов в рамках установленных нормативных интервалов.

3. Особенности моделирования

Проводимый процесс моделирования основан на построении математической модели движения тягового контура, предложенной и апробированной в работах [1 – 5].

Моделирование проводится для трех случаев совместной работы двух гусеничных контуров внутри одного шасси при диагональной компоновке приводов:

1. Коэффициент сопротивления движению от грунта μ_f характеризуется постоянным одинаковым значением для обоих контуров ($\mu_f = 0,1285$ – неукатанная и грязная проселочная дорога). Первый контур работает в толкающем режиме (с задним ведущим колесом), второй контур – в тяговом режиме (с передним ведущим колесом). Скольжение электродвигателя равно номинальному значению и составляет 2% ($\varepsilon = 0,02$).

2. Коэффициент сопротивления движению от грунта μ_f характеризуется интервалом значений ($\mu_f = 0,112...0,145$ – неукатанная и грязная проселочная дорога). Значения в интервале изменяются по зависимости [2]

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

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

где A – коэффициент, определяющий амплитуду колебаний коэффициента μ_f в принятом интервале его значений (для обоих контуров при указанном выше интервале $A = 0,0165$); B – коэффициент преобразования аргумента с целью определения вида функции в пределах установленного интервала (для первого контура $B = 90$, для второго контура $B = 180$); m – медианное значение коэффициента сопротивления движению грунта ($m = 0,1285$).

Первый контур также работает в толкающем режиме (с задним ведущим колесом), второй контур – в тяговом режиме (с передним ведущим колесом). Скольжение электродвигателя равно номинальному значению и составляет 2% ($\varepsilon = 0,02$).

3. Коэффициент сопротивления движению от грунта μ_f определяется в соответствии со вторым расчетным случаем. Первый контур работает в толкающем режиме (с задним ведущим колесом), второй контур – в тяговом режиме (с передним ведущим колесом). Скорость движения гусеничного шасси в каждый момент времени определяется с учетом внешнего вида рабочей ветви механической характеристики электропривода, приведенной к точке на делительной окружности приводной звездочки

где C, k – коэффициенты, определяющие вид рабочей ветви механической характеристики привода; $F_{\text{тяг}}(t)$ – тяговое усилие, реализуемое каким-либо гусеничным контуром в конкретный момент времени.

При допустимом нормативном отклонении скольжения электродвигателей, составляющем 20% от номинальной величины, первое граничное значение скольжения примем равным $\varepsilon = 0,024$, второе граничное значение примем равным $\varepsilon = 0,016$. Для величины скольжения $\varepsilon = 0,016$ коэффициенты для построения зависимости (2) примут значения $C = 2325598$, $k = -5813995$. Для величины скольжения $\varepsilon = 0,02$ коэффициенты в зависимости (2): $C = 1860479$, $k = -4651196$. Для величины скольжения $\varepsilon = 0,024$ коэффициенты в зависимости (2): $C = 1550399$, $k = -3875997$.

Процесс моделирования будем проводить для общего времени движения машины $T = 4$ с, интервал фиксации изменений примем равным $t = 0,25$ с.

4. Анализ результатов моделирования

Результаты моделирования представлены на рис. 3 – 11.

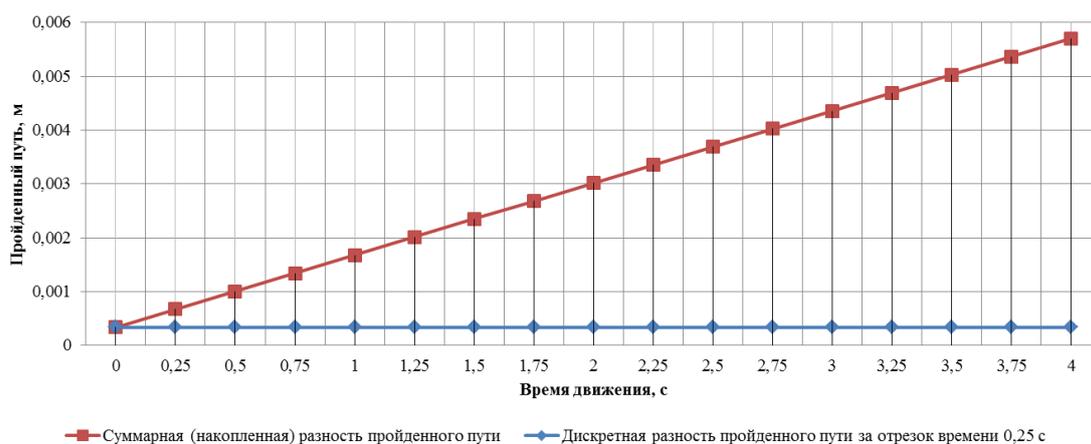


Рис. 3. Графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси (расчетный случай 1)

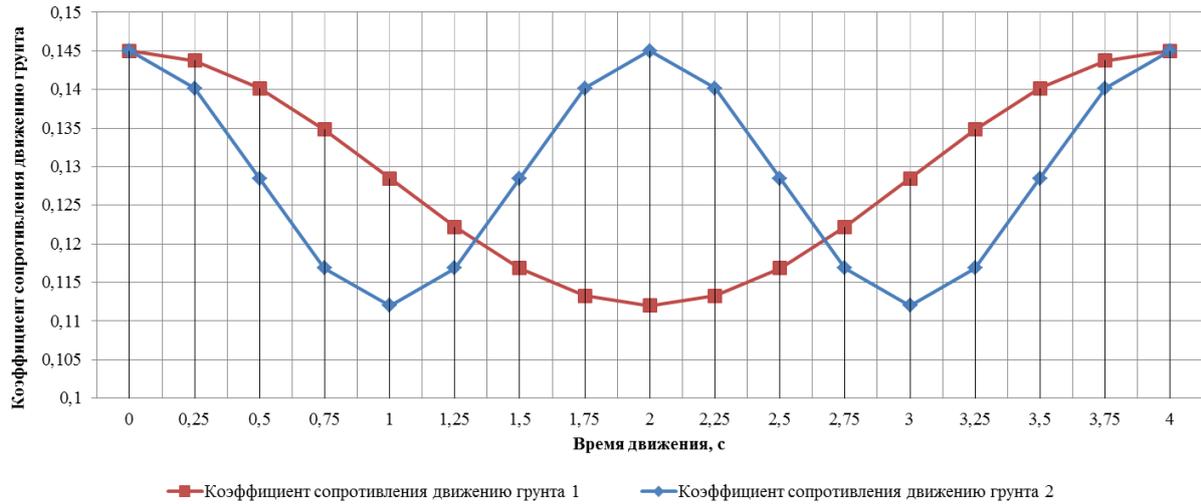


Рис. 4. Графики изменения коэффициента μ_f во времени (расчетные случаи 2 и 3)

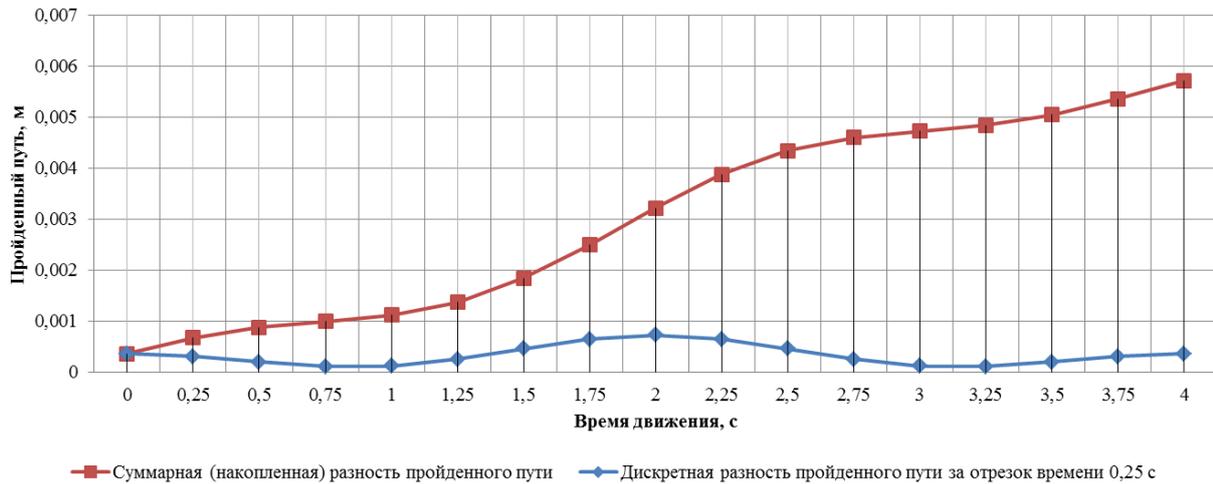


Рис. 5. Графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси (расчетный случай 2)



Рис. 6. Графики изменения тяговых усилий в гусеничных контурах во времени (расчетные случаи 2 и 3)



Рис. 7. Графики изменения скоростей движения контуров во времени (расчетный случай 2)

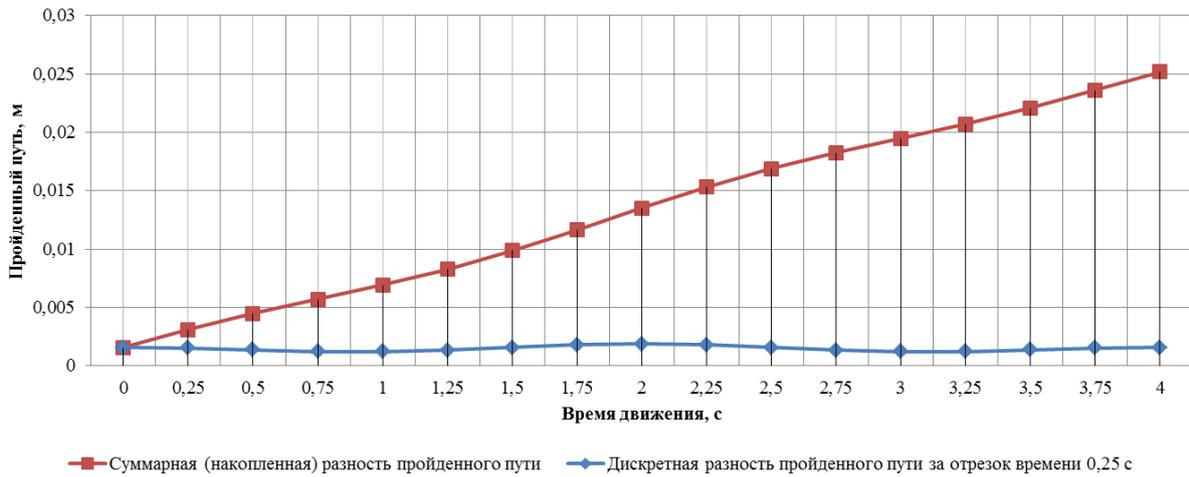


Рис. 8. Графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси (расчетный случай 3, $\varepsilon_1 = 0,016$, $\varepsilon_2 = 0,024$)



Рис. 9. Графики изменения скоростей движения контуров во времени (расчетный случай 3, $\varepsilon_1 = 0,016$, $\varepsilon_2 = 0,024$)

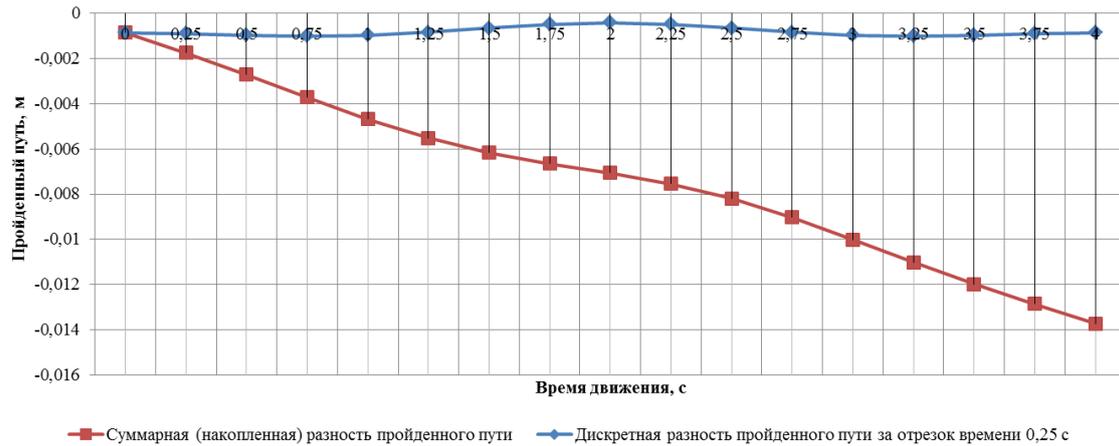


Рис. 10. Графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси (расчетный случай 3, $\varepsilon_1 = 0,024$, $\varepsilon_2 = 0,016$)



Рис. 11. Графики изменения скоростей движения контуров во времени (расчетный случай 3, $\varepsilon_1 = 0,024$, $\varepsilon_2 = 0,016$)

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы:

1. Разность пройденного пути гусеничными контурами в тяговом и толкающем режиме в первом расчетном случае имеет сравнительно небольшую величину (0,005699804 м) в рамках принятого в исследовании отрезка времени – 4 секунды. Стоит отметить, что при одинаковом сопротивлении движению тяговый контур, работающий в толкающем режиме (контур 1) всегда стабильно забегает вперед по отношению к контуру, работающему в тяговом режиме (контур 2). При сохранении всех параметров моделирования в рамках первого расчетного случая относительное забегание гусеничных контуров величиной более 5 см может быть

достигнуто через 40 секунд непрерывного прямолинейного движения.

2. Введение в модель фактора переменности величины коэффициента сопротивления движению грунта (расчетный случай 2) практически не меняет картину относительного забегания гусениц. За расчетные 4 секунды разность пройденного пути гусеничными контурами составляет 0,005725649 м. Также как и в первом расчетном случае, гусеничный контур, работающий в толкающем режиме, забегает вперед по отношению к контуру, работающему в тяговом режиме. Однако стоит отметить неравномерный характер накопления разности пройденного контурами пути, выражающийся в попытках второго контура в периоды уменьшения ко-

эфициента сопротивления движению грунта осуществлять подтягивание к первому контуру.

3. При введении в модель возможных отклонений механических характеристик электродвигателей приводов картина движения контуров меняется значительно. При применении электродвигателя с более жесткой механической характеристикой в структуре гусеничного контура, работающего в толкающем режиме ($\varepsilon = 0,016$), разность пройденного пути гусеничными контурами увеличивается по сравнению с первым и вторым расчетными случаями более чем в 4 раза и составляет 0,025174536 м. Для кинематической схемы с жестким креплением гусениц к раме шасси в течение 40 секунд непрерывного движения машину начнет ощутимо закручивать вокруг гусеницы, работающей в тяговом режиме (за период 40 секунд при сохранении других параметров моделирования взаимное забегание гусениц превысит 25 см). Кинематическая схема с шарнирным креплением гусеничных контуров к раме машины с учетом допустимых люфтов внутри шарниров позволяет частично осуществить выборку разности пройденного контурами пути, после преодоления которой машину также начнет закручивать вокруг гусеницы, работающей в тяговом режиме.

4. При применении электродвигателя с более жесткой механической характеристикой в структуре гусеничного контура, работающего в тяговом режиме ($\varepsilon = 0,016$), и электродвигателя с более мягкой механической характеристикой в структуре контура, работающего в толкающем режиме ($\varepsilon = 0,024$), наблюдается обратная по отношению к предыдущему случаю картина – забегание вперед осуществляет уже контур, работающий в тяговом режиме (величина забегания за 4 секунды составляет 0,013723238 м). При изменении величины скольжения электродвигателя второго контура до номинального значения ($\varepsilon = 0,02$) величину забегания контура, работающего в тяговом режиме по отношению к контуру, работающему в толкающем режиме, удастся снизить до значения 0,004571359 м. Если принять скольжение электродвигателя в тяговом контуре $\varepsilon =$

0,02, а скольжение электродвигателя в толкающем контуре $\varepsilon = 0,024$, то величину забегания тягового контура по отношению к толкающему контуру удастся снизить до значения 0,003426229 м.

5. Заключение

На основании результатов исследований, приведенных в настоящей статье, можно сформулировать следующие тезисы, способствующие совершенствованию процессов проектирования гусеничных шасси с диагональным расположением приводов:

1. Отклонение механических характеристик приводов влияет на параметры движения гусеничного шасси значительно (кратно), чем переменный характер коэффициента сопротивления грунта.

2. При компоновке гусеничного шасси с диагональным расположением приводов целесообразно в контур, работающий в тяговом режиме, устанавливать электродвигатель с более жесткой механической характеристикой по отношению к другому контуру (если известно преимущественное направление движения машины), что компенсирует неравномерность тяговых усилий в контурах, возникающую в результате различной картины распределения натяжений (идеализированный вариант: в тяговый контур устанавливается электродвигатель с номинальным скольжением, в толкающий контур – с отклонением скольжения в сторону смягчения механической характеристики). В этом случае теоретически возможно ограничить относительное забегание гусеничных контуров только движением машины в преимущественном направлении.

3. Кинематическая схема с шарнирным креплением гусеничных контуров к раме при контролируемой величине допустимых люфтов в шарнире выгодна при постоянном и переменном сопротивлении движению грунта, но частично теряет свою эффективность при появлении эффекта отклонения механических характеристик. После полной выборки величины люфта машину при движении начинает закручивать относительно контура, работающего в тяговом режиме.

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. 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. Математическое описание механизмов отклонения положения гусеничных шасси в движении при переменном сопротивлении грунта // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2023. №3. С. 218 – 225. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-03-218-225.

4 Гончаров К.А. Теоретическое исследование влияния переменного сопротивления грунта на положение гусеничных шасси в движении // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2023. №3. С. 226 – 238. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-03-226-238.

5 Гончаров К.А. Моделирование положения гусеничных шасси в движении при отклонении механических характеристик электродвигателей раздельного привода гусеничных контуров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2023. №4. С. 304 – 315. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-04-304-315.

References

1. 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)

2. 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)

3. Goncharov K.A. Mathematical description of deviation mechanisms positions of track chassis in motion with variable ground resistance. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2023, No.3, pp. 218-225. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-03-218-225 (In Russian)

4. Goncharov K.A. Theoretical study of the influence of a variable ground resistance by position tracked chassis in motion. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2023, No.3, pp. 226-238. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-03-226-238 (In Russian)

5. Goncharov K.A. Modeling the position of tracked chassis in motion in the event of mechanical characteristics of separate drive electric motors of track contours. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2023, No.4, pp. 304-315. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-04-304-315 (In Russian)