

УДК (UDC) 621.86

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНЫХ ШАССИ В ДВИЖЕНИИ
ПРИ ОТКЛОНЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ РАЗДЕЛЬНОГО ПРИВОДА
ГУСЕНИЧНЫХ КОНТУРОВMODELING THE POSITION OF TRACKED CHASSIS IN MOTION
IN THE EVENT OF MECHANICAL CHARACTERISTICS
OF SEPARATE DRIVE ELECTRIC MOTORS OF TRACK CONTOURSГончаров 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. Отклонение механических характеристик электродвигателей от номинальных значений при их одновременной работе в структуре многодвигательных приводов способно дестабилизировать точность прогнозирования поведения всей механической системы. Применение электродвигателей в структуре раздельного привода контуров гусеничного шасси при случайном сочетании отклонений их скольжения может усилить факторы, способствующие относительному забеганию контуров, так и компенсировать их в зависимости от функции изменения коэффициента сопротивления движению во времени. В данной статье приводится описание процесса и результаты моделирования положения гусеничных шасси в движении при отклонении механических характеристик электродвигателей раздельного привода гусеничных контуров. Предлагаемая математическая модель с одной стороны учитывает возможность изменения коэффициента сопротивления движению во времени, а с другой – оперирует вариативным подходом к определению скоростей движения гусеничных контуров на основе системы отклонений скольжения электродвигателей. С учетом полученных результатов предложены рекомендации по подбору электродвигателей для контуров гусеничных шасси.

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

Дата получения статьи: 23.08.2023
Дата принятия к публикации: 30.09.2023
Дата публикации: 25.12.2023

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. Deviation of the mechanical characteristics of electric motors from the nominal values during their simultaneous operation in the structure of multi-motor drives can destabilize the accuracy of predicting the behavior of the entire mechanical system. The use of electric motors in the structure of a separate drive of the tracked chassis circuits with a random combination of deviations of their sliding can both enhance the factors contributing to their relative run-up of the circuits and compensate for them depending on the function of the change in the motion resistance coefficient over time. This article provides a description of the process and results of modeling the position of the tracked chassis in motion when the mechanical characteristics of the electric motors of the separate drive of the tracked circuits deviate. The proposed mathematical model, on the one hand, takes into account the possibility of changing the coefficient of resistance to movement over time, and on the other hand, it operates with a variable approach to determining the speed of movement of tracked circuits based on a system of sliding deviations of electric motors. Taking into account the results obtained, recommendations were proposed for the selection of electric motors for the circuits of tracked chassis.

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

Date of manuscript reception: 23.08.2023
Date of acceptance for publication: 30.09.2023
Date of publication: 25.12.2023

Author's 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

Наземные транспортно-технологические средства и комплексы, установленные на гусеничные шасси с электроприводом, не являются используемым редко видом техники. В качестве основного проблемного аспекта применения электродвигателей в структурах таких машин можно назвать необходимость решения проблемы с подводом электроэнергии. В связи с этим электропривод в гусеничных шасси применяется либо в условиях работы машин на стационарных ограниченных площадках, либо при наличии возможности компоновки машины автономным генератором электроэнергии. Как правило, в обоих случаях машины воспринимают значительные нагрузки и имеют сравнительно небольшие скорости движения.

Помимо проблем с переменным значением коэффициента сопротивления движению тяговых контуров, описанных в работах [1 – 4], дополнительным дестабилизирующим фактором при движении гусеничного шасси с отдельным электроприводом (в плане относительного забегания гусениц) являются возможные отклонения скольжения электродвигателей контуров, приводящие к рассинхронизации скоростей их движения [5].

Если в случае возникновения подобных явлений в структуре многоприводного ленточного конвейера стабилизирующим фактором является сама грузонесущая лента, с которой взаимодействуют все приводы [5], а основные последствия заключаются в неравномерном распределении натяжений ленты в контуре, то в случае гусеничного шасси неравномерность скоростей движения приводов приводит к мгновенным изменениям положения всей машины в пространстве. При проведении точных планировочных работ любого рода возможные случайные отклонения положения машины с одной стороны могут привести к нарушению технологии выполнения работ, а с другой – потребовать определенного мастерства оператора по недопущению

срыва траектории движения машины, что в случае отсутствия соответствующей квалификации и опыта также приводит к нарушению технологии выполнения работ.

В работе [6] предложена система сочетаний отклонений скольжения электродвигателей при вероятностном моделировании распределения тяговых усилий в многодвигательных приводах ленточных конвейеров. Применительно к ситуации с отклонениями скольжения электродвигателей приводов гусеничного шасси данная система сочетаний может быть адаптирована для совместной работы двух электрических приводов при выводе из модели общесистемных отклонений от растяжения ленты, а также общесистемных и внутренних отклонений от воздействия системы управления (при моделировании движения машины на естественных механических характеристиках электродвигателей). С учетом зависимости (2), приведенной в работе [6], для получения общей картины влияния отклонений скольжения электродвигателей приводов гусеничных контуров на положение шасси в целом понадобится проанализировать девять сочетаний.

2. Цель исследования

Целью настоящего исследования является построение математической модели изменения положения гусеничного шасси в движении при отклонении механических характеристик электродвигателей отдельного привода гусеничных контуров. Математическая модель должна учитывать возможный случайный характер изменения коэффициента сопротивления движению грунта во времени, возможные случайные отклонения скольжения электродвигателей приводов. В процессе моделирования должна присутствовать возможность анализа натяжений гусеничных контуров, в том числе возможность управления натяжениями для устранения неравномерности скоростей их движения.

3. Особенности проведения исследования

Предлагаемая в настоящей статье математическая модель изменения положения гусеничного шасси в движении при отклонении механических характеристик электродвигателей раздельного привода гусеничных контуров представляет собой симбиоз модели, описывающей положение шасси при переменной сопротивляемости движению грунта [1, 3, 4], и элементов вероятностной математической модели распределения тяговых

усилий между приводами в структуре многоприводных ленточных конвейеров [7]. Из вероятностной модели [7], как было показано во введении, исключаются общесистемные отклонения от растяжения ленты, а также общесистемные и внутренние отклонения от воздействия системы управления.

С учетом рекомендаций [6] в структуру модели для двухконтурного гусеничного шасси введем девять сочетаний отклонений скольжения их электродвигателей (табл. 1).

Таблица 1

Система сочетаний отклонений скольжения электродвигателей гусеничных контуров

Электродвигатель	Скольжение электродвигателя в рамках сочетания								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Электродвигатель 1-го контура	α	α	α	$s_{ном}$	$s_{ном}$	$s_{ном}$	β	β	β
Электродвигатель 2-го контура	α	$s_{ном}$	β	α	$s_{ном}$	β	α	$s_{ном}$	β

В табл. 1: α – уменьшенное на 20% скольжение электродвигателя по отношению к номинальному, β – увеличенное на 20% скольжение электродвигателя по отношению к номинальному, $s_{ном}$ – номинальное скольжение электродвигателя.

При построении модели значение $s_{ном}$ заменим на сокращенный в два раза (на 10%) интервал отклонения скольжения. Так как вторая часть модели оперирует различного вида функциями изменения коэффициента сопротивления движению во времени, а в работе [4] описываются расчетные случаи при одинаковых механических характеристиках приводов, то относительный результат для двух контуров при одинаковом номинальном скольжении не будет значительно отличаться от описанного в [4]. В связи с

этим введем в модель 10%-го интервала расширит объем полученного результата для проведения более качественного анализа поведения всей системы.

Дополнительно уберем из системы сочетания, в которых взаимодействует одна отклоненная граница интервала с номинальным скольжением. Подобные сочетания в данном случае анализировать не имеет смысла, так как результат моделирования изначально предполагает получение более смягченных параметров по отношению к случаям взаимодействия двух противоположных граничных значений интервалов.

Обновленная с учетом приведенных аргументов система сочетаний скольжения электродвигателей представлена в табл. 2.

Таблица 2

Система сочетаний отклонений скольжения электродвигателей гусеничных контуров

Электродвигатель	Скольжение электродвигателя в рамках сочетания		
	1	2	3
Электродвигатель 1-го контура	α (20%)	α (10%)	β (20%)
Электродвигатель 2-го контура	β (20%)	β (10%)	α (20%)

Моделирование проведем для случая, описанного в работе [4], соответствующего третьему этапу исследования – коэффициенты сопротивления движению грунта гусеничных контуров находятся в противофазе, при этом для первого контура коэффициент изменяется в верхней половине максималь-

ного диапазона, для второго контура – в нижней половине [4].

Таким образом, одни сочетания отклоненных характеристик усилят эффект изменения положения машины в пространстве, а другие – компенсируют его.

Механические характеристики приводов построим по зависимостям, предложенным в [3], отталкиваясь от двух значений номинального скольжения – 0,02 (соответствует естественной механической характеристике большинства электродвигателей с короткозамкнутым ротором) и 0,03 (небольшое от-

клонение механической характеристики в сторону её смягчения).

4. Результаты моделирования

Результаты моделирования при описанных выше условиях представлены на рис. 1 – 19.

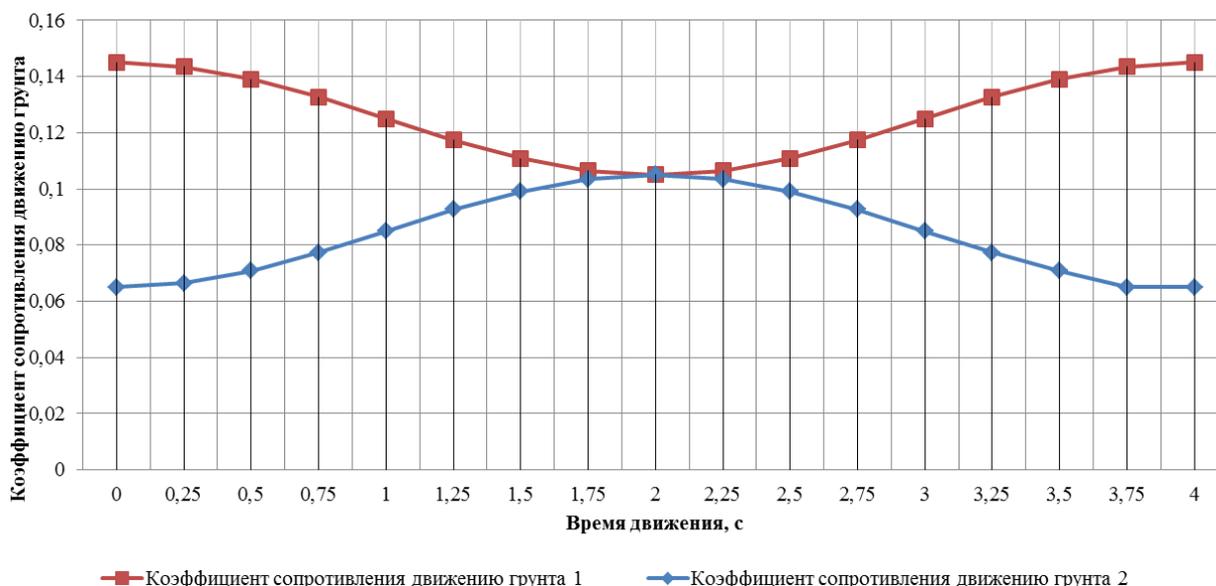


Рис. 1. Графики изменения коэффициента μ_f во времени [4]



Рис. 2. Графики изменения скоростей движения контуров во времени ($s_{ном} = 0,02$; сочетание 1 в табл. 2)

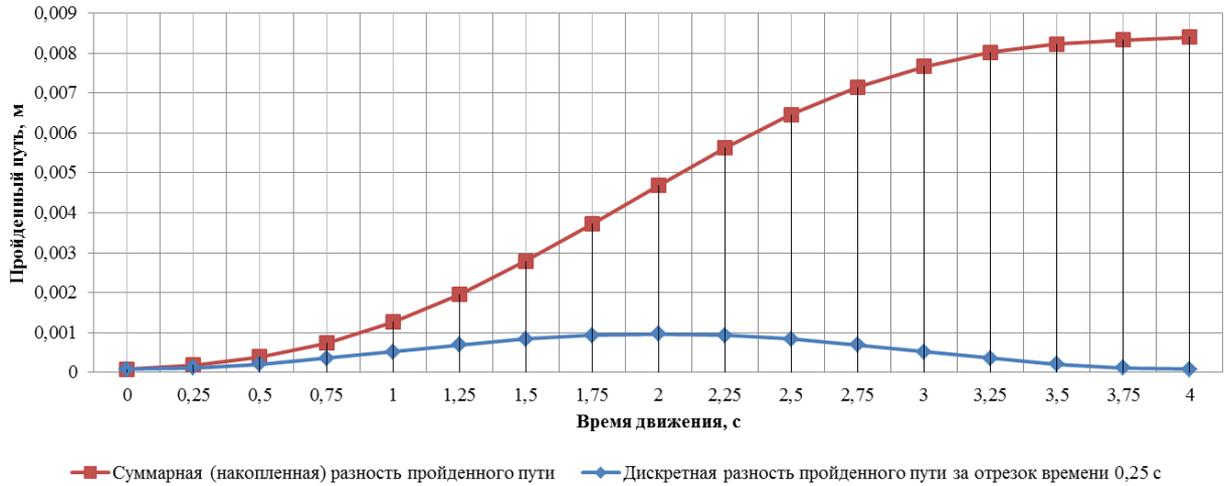


Рис. 3. Графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси ($s_{ном} = 0,02$; сочетание 1 в табл. 2)



Рис. 4. График изменения угла поворота машины во времени ($s_{ном} = 0,02$; сочетание 1 в табл. 2)



Рис. 5. Графики изменения скоростей движения контуров во времени ($s_{ном} = 0,02$; сочетание 3 в табл. 2)

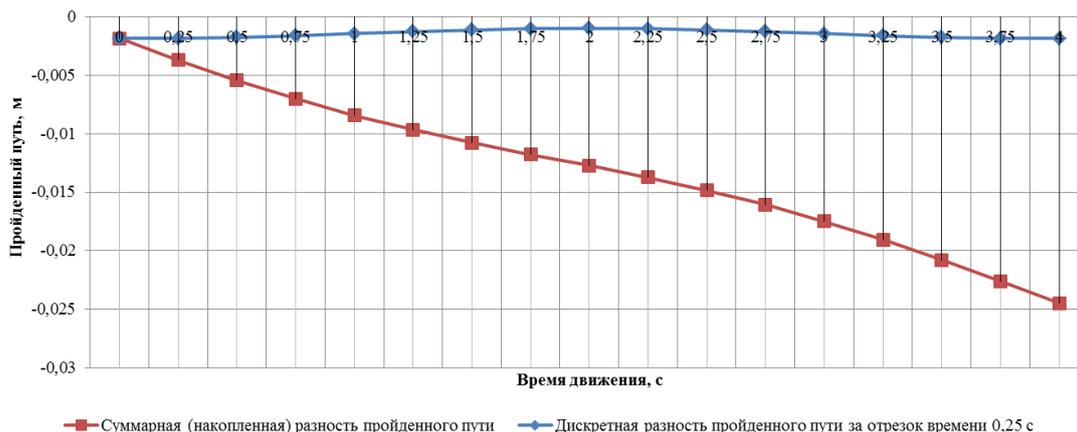


Рис. 6. Графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси ($s_{ном} = 0,02$; сочетание 3 в табл. 2)

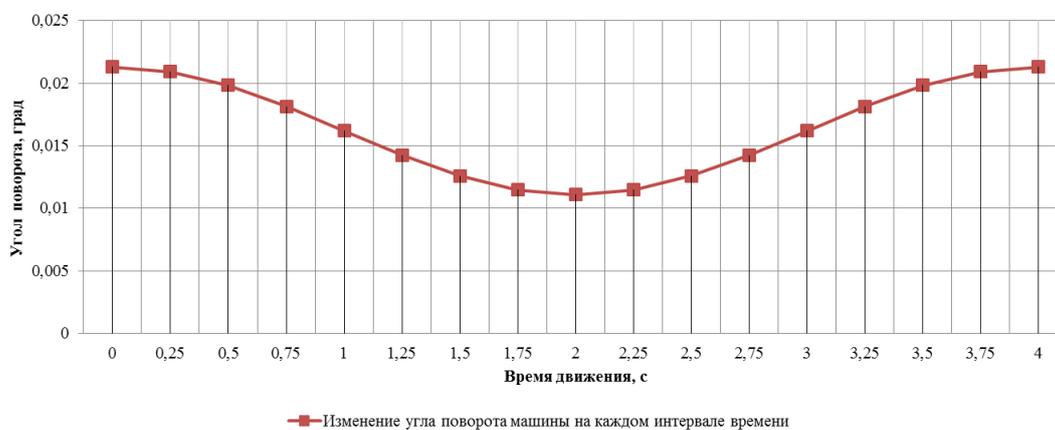


Рис. 7. График изменения угла поворота машины во времени ($s_{ном} = 0,02$; сочетание 3 в табл. 2)

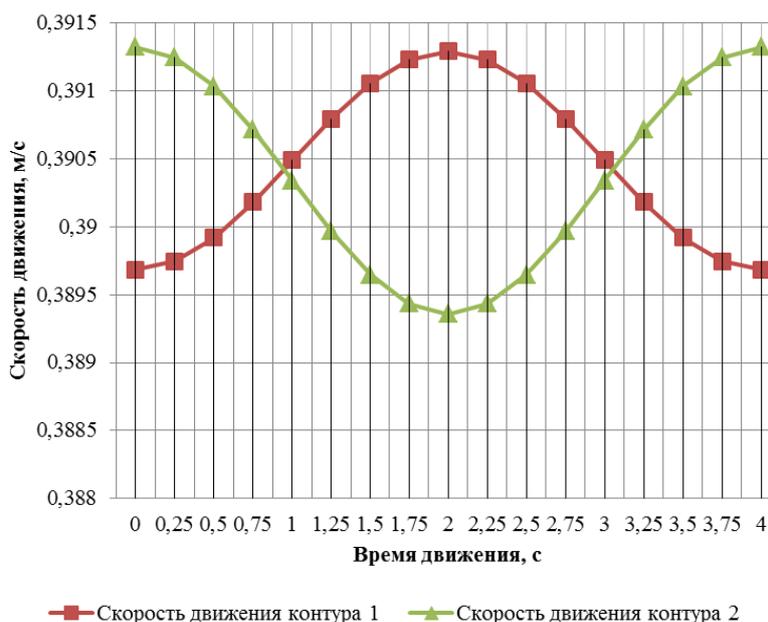


Рис. 8. Графики изменения скоростей движения контуров во времени ($s_{ном} = 0,02$; сочетание 2 в табл. 2)

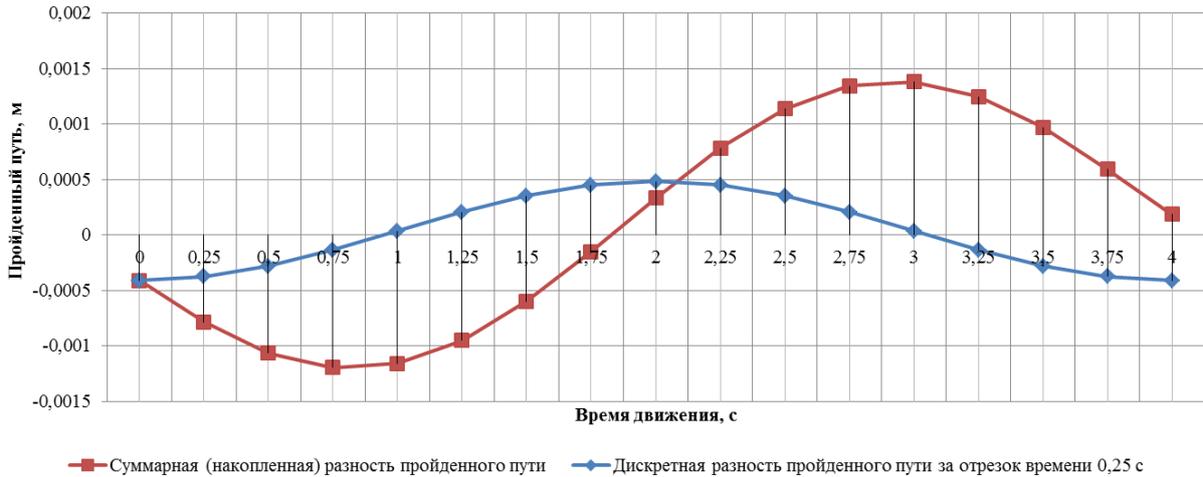


Рис. 9. Графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси ($s_{ном} = 0,02$; сочетание 2 в табл. 2)



Рис. 10. График изменения угла поворота машины во времени ($s_{ном} = 0,02$; сочетание 2 в табл. 2)



Рис. 11. Графики изменения скоростей движения контуров во времени ($s_{ном} = 0,03$; сочетание 1 в табл. 2)

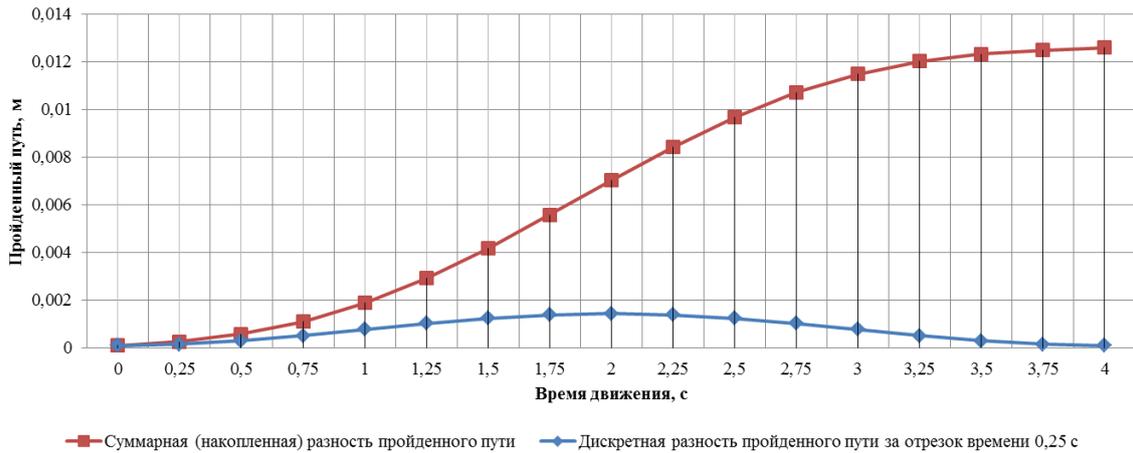


Рис. 12. Графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси ($s_{НОМ} = 0,03$; сочетание 1 в табл. 2)

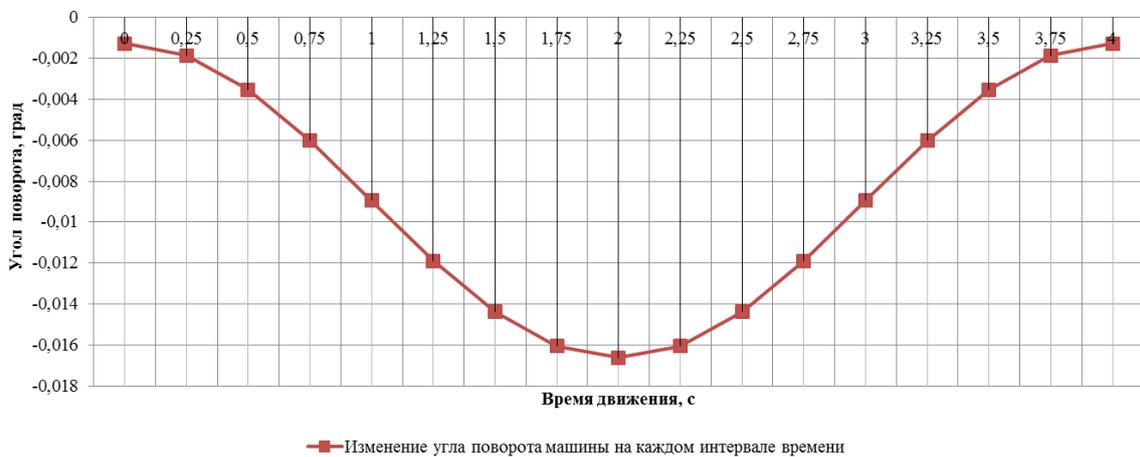


Рис. 13. График изменения угла поворота машины во времени ($s_{НОМ} = 0,03$; сочетание 1 в табл. 2)



Рис. 14. Графики изменения скоростей движения контуров во времени ($s_{НОМ} = 0,03$; сочетание 3 в табл. 2)

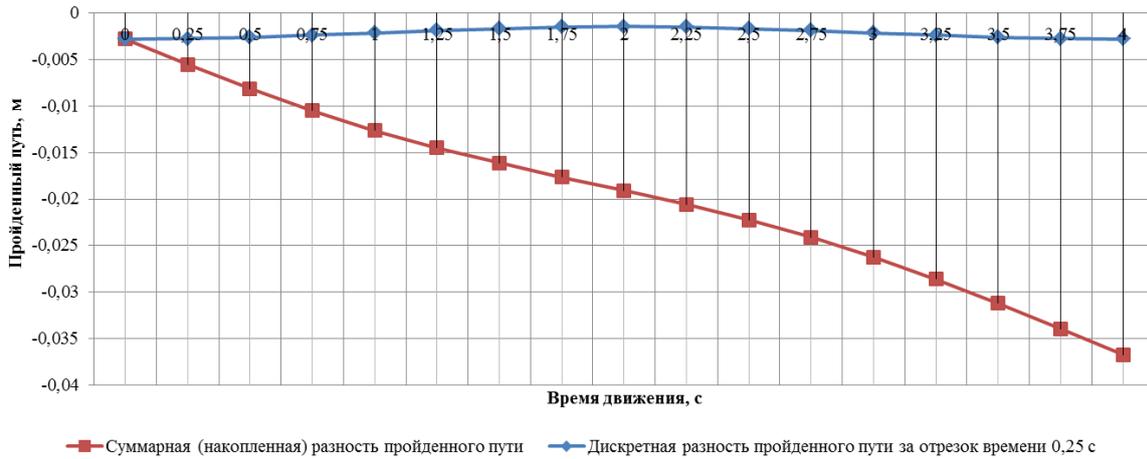


Рис. 15. Графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси ($s_{ном} = 0,03$; сочетание 3 в табл. 2)



Рис. 16. График изменения угла поворота машины во времени ($s_{ном} = 0,03$; сочетание 3 в табл. 2)

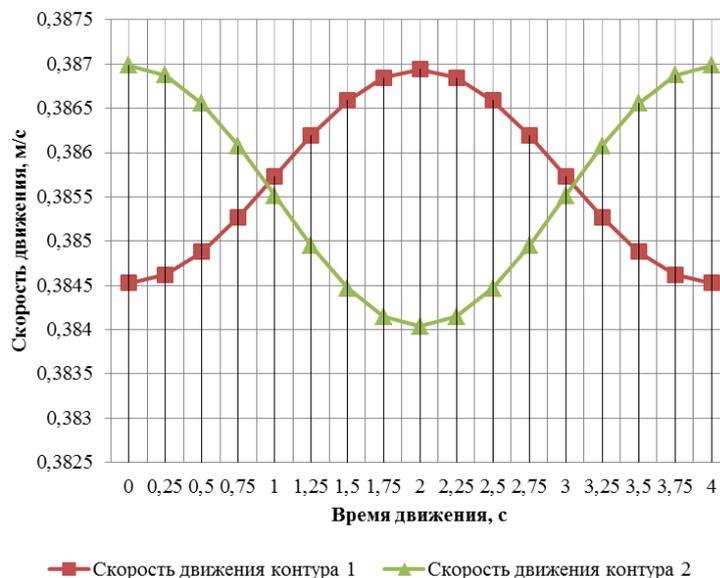


Рис. 17. Графики изменения скоростей движения контуров во времени ($s_{ном} = 0,03$; сочетание 2 в табл. 2)

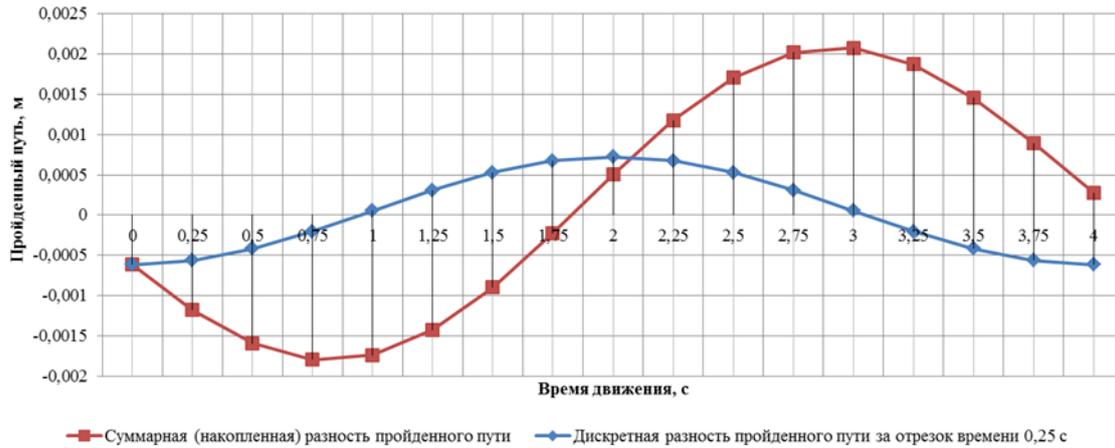


Рис. 18. Графики разностей пройденного пути каждым из контуров гусеничного шасси ($s_{ном} = 0,03$; сочетание 2 в табл. 2)



Рис. 19. График изменения угла поворота машины во времени ($s_{ном} = 0,03$; сочетание 2 в табл. 2)

5. Анализ результатов

Анализируя полученные данные можно сделать следующие общие выводы:

1 Эффект отклонения скольжения в рамках допустимого интервала $\pm 20\%$ может полностью перекрыть негативное воздействие неравномерности сопротивления грунта, что наблюдается при совмещении графиков скоростей гусеничных контуров в каждом сочетании. С этой позиции наилучшими оказываются сочетания 2 в табл. 2 для каждого значения номинального скольжения – в данных сочетаниях скорости контуров взаимно стабилизируются в течение временного цикла исследования. При этом сочетания 2 не являются идеальными, т.к. полностью не

компенсируют отклонения скоростей, однако, с учетом результатов в других сочетаниях можно утверждать, что в любой проектной ситуации существует оптимальная функция управления механическими характеристиками электродвигателей, позволяющая в течение заданного периода времени нивелировать эффект неравномерности сопротивления грунта.

2 Для граничных значений интервалов отклонения скольжения при заданной неравномерности сопротивления грунта полученный результат исследования позволяет утверждать, что при противофазном совпадении эффекта отклонения скольжения и эффекта неравномерности сопротивления грунта происходит частичная стабилизация по-

ложения машины (рис. 3, 6). На рис. 3 показано, что при противофазном совпадении накопленная разность пройденного контурами пути составляет примерно 8,5 мм. При фазном же совпадении (рис. 6) сочетание отклонений скольжения усугубляет эффект от неравномерности сопротивления грунта, что отображается в накопленной разности пройденных путей – 25 мм.

3 При смягчении механических характеристик электродвигателей (переходе значения скольжения от величины 0,02 к величине 0,03) все описанные в первых двух выводах явления пропорционально увеличивают свою значимость примерно на 1/3.

На основе полученных выводов можно предложить следующие рекомендации по выбору электродвигателей и систем управления электроприводом для гусеничных шасси:

1 Если проектная ситуация предполагает, что электродвигатели должны функционировать на естественных механических характеристиках (применение простейших систем управления или их отсутствие), то наилучший результат в контексте влияния отклонений скольжения на изменение положения машины в пространстве оказывает выбор электродвигателей с минимально возможными значениями номинального скольжения.

2 С учетом полученных результатов наилучшим в настоящий момент вариантом компоновки электропривода гусеничных шасси является сочетание электродвигателей с короткозамкнутым ротором и систем управления на основе тиристорных преобразователей частоты. Такие системы с шагом управления видом механических характеристик величиной хотя бы 1 Гц позволят гибко нивелировать изменения положения машины в целом при условии отслеживания сопротивлений движению для каждого контура. Однако возможность установки таких приводов на гусеничные шасси необходимо исследовать в соответствии с другими техническими критериями (эргономическими, экологическими, экономическими и т.д.).

3 Применение в гусеничных шасси электродвигателей с фазным ротором в комплексе с системами управления на основе ступенчатого изменения сопротивления в цепи ротора за счет смягчения механических характеристик может привести к значительному увеличению отклонений положения машины при движении. При этом ступенчатое управление не позволит нивелировать небольшие перекосы, изменяя характеристики в строго определенных диапазонах.

5. Заключение

Результаты проведенного исследования, показанного в настоящей статье, позволяют сделать один обобщенный вывод, применимый ко многим многодвигательным системам: в случае наличия в многодвигательной системе элемента, результирующего скорости, создаваемые всеми приводами (грузонесущая лента в ленточных конвейерах, с которой взаимодействуют все приводы, корректирующая своей скоростью нагрузку на каждый привод), целесообразным является применение электродвигателей со смягченными механическими характеристиками, что снижает дисбаланс распределения тяговых усилий между приводами. В случае отсутствия в многодвигательной системе результирующего элемента целесообразно применение электродвигателей с жесткими механическими характеристиками, которые в случае значительных перепадов сопротивлений, воздействующих на каждый привод, будут изменять скорость движения незначительно (гусеничные шасси, мостовые и другие краны с отдельным приводом механизма передвижения и т.п.).

Результаты исследования, приведенные в данной статье, предполагают дальнейшее развитие, в том числе изучение комплексной возможности стабилизации положения машин за счет взаимодействия систем управления механическими характеристиками приводов и устройств, управляющих натяжениями тяговых лент гусеничных контуров в структуре гусеничного шасси.

Список литературы

1. 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.

2 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.

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., Дунаев В.П. Комплексный подход к тяговому расчету ленточных конвейеров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2018. №2. С. 144–151. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-02-144-151.

6 Гончаров К.А. Система сочетаний отклонений скольжения электродвигателей при вероятностном моделировании распределения тяговых усилий в многодвигательных приводах ленточных конвейеров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2019. №3. С. 288–295. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-03-288-295.

7 Гончаров К.А. Тяговый расчет многоприводных ленточных конвейеров / К.А. Гончаров. Курск: ЗАО "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. 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)

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., Dunaev V.P. The integrated approach to traction calculation of belt conveyors. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No.2, pp. 144-151. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-02-144-151 (In Russian)

6. Goncharov K.A. Combination system of slide variations of electric motors when using a probabilistic modeling approach of tractive effort distribution in multimotor drives of multidrive belt conveyors. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.3, pp. 288-295. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-03-288-295 (In Russian)

7. Goncharov K.A. *Tyagovyi raschet mnogoprivodnyh lentochnyh konveyerov* [Traction calculation of multi-drive belt conveyor]. Kursk, ZAO Universitetskaya kniga, 2021. 271 p. (In Russian)