

Научная статья
УДК 629.369

Оценка нагруженности приводных осей самоходных модульных транспортных средств при различных режимах эксплуатации

Алексей Вадимович Мидаков¹, Михаил Александрович Пузров²,
Сергей Львович Тропин³, Александр Николаевич Мисинев⁴

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН),
Москва, Россия

^{2,3}МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

⁴ООО «ОКБ «Спецтяжпроект», Москва, Россия

¹aleksei_midakov@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3879-6839>

²pma22ra008@student.bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9986-5535>

³tropin@spectyazh.ru

⁴misinev.alexandr@okb-om.ru

Аннотация. В данной работе представлена оценка нагруженности приводных осей самоходных модульных транспортных средств (далее по тексту СМТС) при различных режимах. СМТС используются для перевозки крупногабаритных тяжеловесных грузов. В статье приведено описание особенностей СМТС и конструкции приводной оси на примере транспортера Cometto MSPE EVO2. На основании технических характеристик СМТС определены зависимости максимальной частоты вращения входного вала приводной оси от крутящего момента для различных конфигураций. Полученные зависимости позволяют определить параметры движения СМТС: максимальную скорость для каждой конфигурации в зависимости от нагрузочных условий (осевая нагрузка и продольный уклон дороги). На основе рассчитанных параметров работы СМТС может быть определено время прохождения маршрута перевозки и выбрана необходимая конфигурация для преодоления маршрута с известными характеристиками (продольный уклон) с конкретной массой груза.

Ключевые слова: самоходные модульные транспортные средства, приводная ось, осевая нагрузка, максимальная скорость движения, продольный уклон.

Для цитирования: Мидаков А.В., Пузров М.А., Тропин С.Л., Мисинев А.Н. Оценка нагруженности приводных осей самоходных модульных транспортных средств при различных режимах эксплуатации // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №4 (38).

Original article

Assessment of load of drive axles of self-propelled modular vehicles under different operating modes

Aleksei V. Midakov¹, Mikhail A. Puzrov², Sergey L. Tropin³, Alexander N. Misinev⁴

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN),
Moscow, Russia

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

LLC «OKB «Spetstyazhproekt», Moscow, Russia

¹aleksei_midakov@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3879-6839>

²pma22ra008@student.bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9986-5535>

³tropin@spectyazh.ru

⁴misinev.alexandr@okb-om.ru

Abstract. This paper presents an assessment of the load on the drive axles of self-propelled modular trailers (hereinafter referred to as SPMT) under various modes. SPMT is used for transportation of oversized heavy cargo. The article describes the features of the SPMT and the design of the drive axle using the example of the Cometto MSPE EVO2. Based on the technical characteristics of the SPMT determines the dependence of the maximum rotation speed of the input shaft of the drive axle on torque for various configurations. The obtained dependence allows us to determine the movement parameters of the SPMT: the maximum speed for each configuration depending on the load conditions (axial load and longitudinal slope of the road). Based on the calculated operating parameters of the SPMT, the travel time for the transportation route can be determined and the necessary configuration can be selected to overcome the route with known characteristics (longitudinal slope) with a specific cargo weight.

Keywords: self-propelled modular trailers, drive axle, axle load, maximum speed, longitudinal slope.

For citation: Midakov A.V., Puzrov M.A., Tropin S.L., Misinev A.N. Assessment of load of drive axles of self-propelled modular vehicles under different operating modes. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura.* 2023. №4 (38).

Введение

Самоходные модульные транспортные средства (далее по тексту СМТС) применяются для перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов (далее по тексту КТГ).

ТС – транспортное средство (далее по тексту ТС), которое состоит из силового блока и отдельных модулей с числом осевых линий обычно от трех до шести. Модули имеют возможность продольной и поперечной стыковки между собой для формирования ТС необходимой конфигурации. Обычно конфигурация ТС определяется массой и габаритами груза, допустимыми осевыми нагрузками на опорную поверхность, прочностью рамы транспортера и т.п. [1].

Для движения СМТС, в отличие от несамоходной прицепной техники, не используются седельные или балластные тягачи. Тяговое усилие создается гидромоторами, размещенными на осях СМТС, называемых приводными. Количество приводных осевых (далее по тексту ПрО) линий и осевых линий с тормозом может быть различным [1]. На одной осевой линии размещается от двух осей и более. Привод гидромотора осуществляется через гидронасос, установленный в силовом блоке. Мощность гидронасоса распределяется на все гидромоторы СМТС.

Современные СМТС оснащены бортовыми компьютерами, расположенными в силовом блоке. На рабочем экране бортового компьютера визуализированы текущие параметры работы СМТС, однако оценка и отображение степени загруженности ПрО с учетом используемой конфигурации ТС не предусмотрены. Пример рабочего экрана СМТС Cometto MSPE EVO2 представлен на рис. 1 [2], где 1 – изображение конвоя (информация о конфигурации конвоя, и т.п.), 2 – указание угла поворота подвесок, 3 – меню, 4 – окно сообщений системы, 5 – статус СМТС, 6 – сигнальные символы первостепенной важности, 7 – сигнальные символы обычной важности, 8 – выполняемая функция, 9 – график степени нажатия на педаль акселератора и цифровой указатель оборотов двигателя, 10 – график тормозного усилия (указывает степень тормозного усилие в %), 11 – указатель уровня гидравлического масла, 12 – состояние гидравлических насосов.

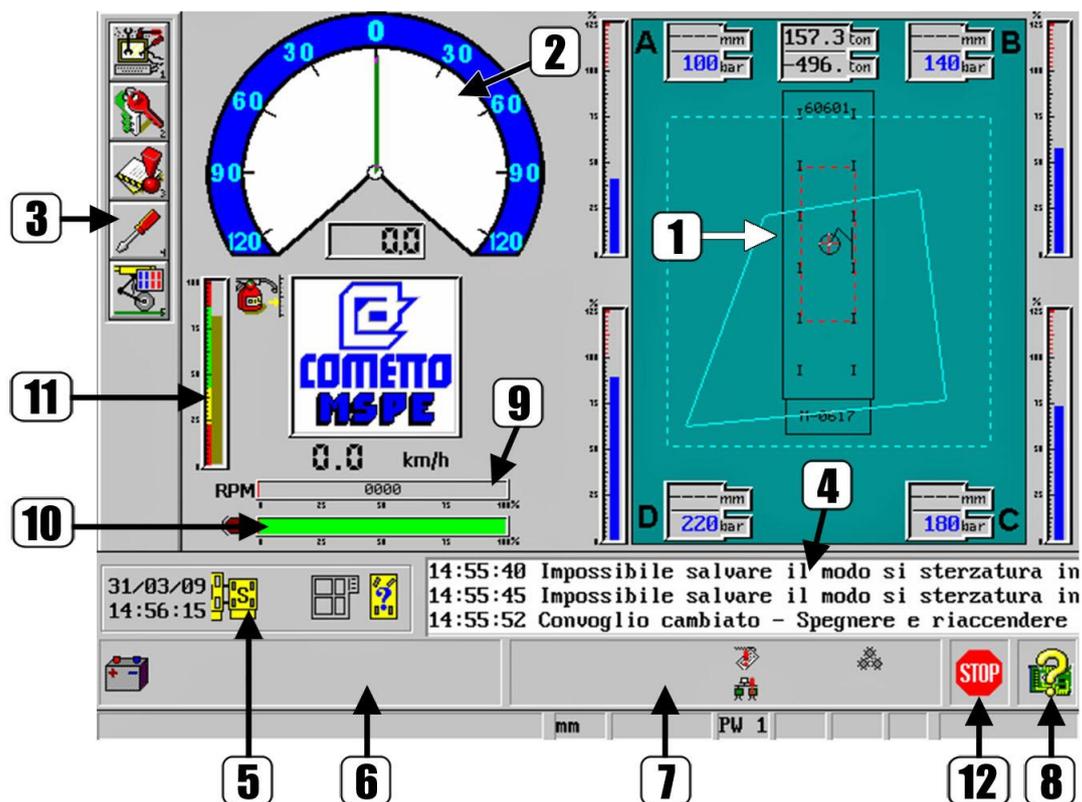


Рис. 1. Рабочий экран CMTC Cometto MSPE EVO2

Описание приводной оси

Общий вид ПрО CMTC Cometto MSPE EVO2 представлен на рис. 2. Приводной гидромотор установлен на корпусе главной передачи. Внутри корпуса размещается коническая главная передача с межколесным дифференциалом. Крутящий момент от дифференциала на ступицу колеса передается через 2 ряда планетарных колесных редукторов.

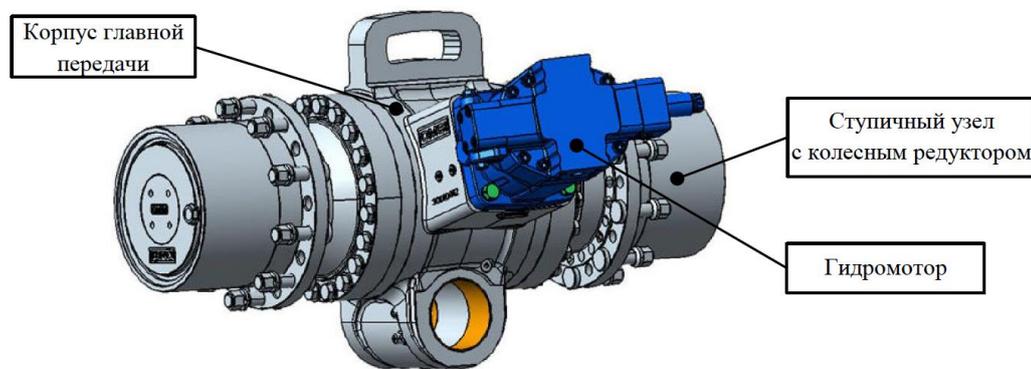


Рис. 2. Общий вид ПрО CMTC Cometto MSPE EVO2

Кинематическая схема ПрО СМТС Cometto MSPE EVO2 представлена на рис. 3, где 1 – ведущий вал-шестерня конической главной передачи; 2 – ведомое колесо конической главной передачи; 3 – корпус дифференциала; 4 – промежуточный вал планетарного редуктора; 5 – солнечная шестерня 2-го ряда планетарного редуктора; 6 – водило 2-го ряда планетарного редуктора; 7 – сателлит 2-го ряда планетарного редуктора; 8 – коронная шестерня 2-го ряда планетарного редуктора; 9 – солнечная вал-шестерня 1-го ряда планетарного редуктора; 10 – водило 1-го ряда планетарного редуктора; 11 – сателлит 1-го ряда планетарного редуктора; 12 – коронная шестерня 1-го ряда планетарного редуктора; 13 – колесо.

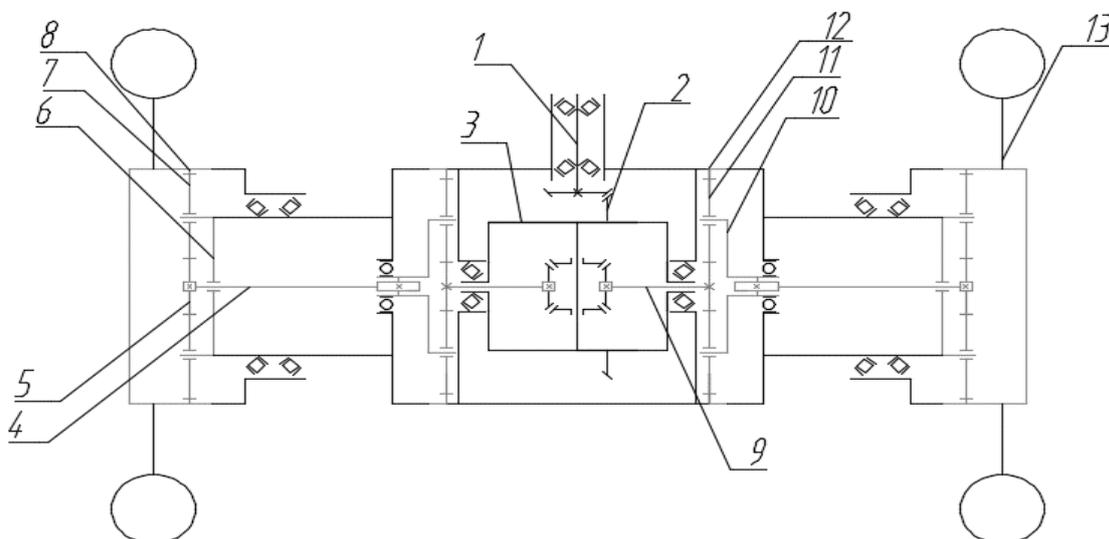


Рис. 3. Кинематическая схема ПрО СМТС Cometto MSPE EVO2

Определение параметров работы входного вала для конфигурации транспортера

Нагруженность ПрО характеризуется частотой вращения $N_{вх}$ (об/мин) входного вала и приложенным к нему крутящим моментом $M_{кр}$ (Н·м).

Количественное определение нагруженности приводной оси позволит оценить возможность и время прохождения маршрута перевозки для каждого вида конфигурации СМТС. Конфигурации СМТС Cometto MSPE EVO2 и их характеристики [3] представлены в табл. 1.

Таблица 1

Конфигурации СМТС Cometto MSPE EVO2 и их характеристики

Конфигурация	Кол-во осевых линий, шт.	Общее кол-во осей, шт.	Кол-во ПрО, шт.	Собственная масса, т	Грузоподъемность, т	Полная масса, т
С1Р6а	6	12	4	31,5	328,5	360,0
С1Р12а	12	24	8	55,0	665,0	720,0
С1Р18а	18	36	12	78,5	1001,5	1080,0
С1Р24а	24	48	16	102,0	1338,0	1440,0
Л1Р6а	6	24	8	55,0	665,0	720,0
Л1Р12а	12	48	12	102,0	1338,0	1440,0
Л1Р18а	18	72	24	149,0	2011,0	2160,0

Для расчета нагруженности воспользуемся данными из технической документации на СМТС Cometto MSPE EVO2 [3], в которой на каждый вид конфигурации приведены три нагрузочных режима:

– движение бесполезной нагрузки на максимально возможной скорости на горизонтальном участке. Соответствует случаю движения 1 в табл. 3;

– движение с максимальной полезной нагрузкой на максимально возможной скорости на горизонтальном участке. Соответствует случаю движения 2 в табл. 3;

– движение с максимальной полезной нагрузкой на максимально возможной скорости на максимальном уклоне в подъем. Соответствует случаю движения 3 в табл. 3.

Приведенные в технической документации показатели движения для различных конфигураций с одним силовым блоком для каждого нагрузочного режима представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технические показатели движения для каждой конфигурации транспортера Cometto MSPE EVO2 с одним силовым блоком

Конфигурация	Сила сопротивления движению P_c при уклоне 0%, кг·с		Макс. реализуемое тяговое усилие СМТС, кг·с	Движение с макс. осевой нагрузкой на макс. возможной скорости при макс. уклоне		Макс. скорость при продольном уклоне 0%, км/ч	
	С макс. грузом	Порожний		Уклон α , %	Скорость V_{max} , км/ч	С макс. грузом	Порожний
С1Р6а	9000	788	26238	4,8	3,3	15,9	7,1
С1Р12а	18000	1375	52656	4,8	1,6	11,5	3,6
С1Р18а	27000	1963	78984	4,8	1,1	7,7	2,4
С1Р24а	36000	2550	105212	4,8	0,8	5,8	1,8
Л1Р6а	18000	1375	52656	4,8	1,6	11,5	3,6
Л1Р12а	36000	2550	105212	4,8	0,8	5,8	1,8
Л1Р18а	54000	3725	157968	4,8	0,5	3,8	1,2

При движении ТС на него действует сила сопротивления движению, складывающаяся из следующих составляющих:

- сила сопротивления качению колес – P_f ;
- сила сопротивления подъему – P_h ;
- сила инерции автомобиля – P_j ;
- сила сопротивления воздуха – P_w .

В связи с тем, что оценка нагруженности ПрО проведена для равномерного движения на малых скоростях, силы инерции и сопротивления воздуха были исключены.

Сила сопротивления качению определяется по формуле:

$$P_f = f \cdot M, \quad (1)$$

где f – коэффициент сопротивления качению;

M – масса ТС с грузом.

Сила сопротивления качению на подъеме определяется по формуле:

$$P_h = \frac{\alpha}{100} \cdot M, \quad (2)$$

где α – величина продольного уклона поверхности дороги в %.

Тогда с учетом формул (1) и (2) сила сопротивления движению определяется по формуле:

$$P_c = M \cdot \left(f + \frac{\alpha}{100} \right). \quad (3)$$

Значения силы сопротивления движению, представленные в табл. 2, подтверждаются расчётами, выполненными по формуле (3). При этом коэффициент сопротивления качению принят равным 0,025.

Зная характеристики ПрО и колеса и используя данные из табл. 2, можно определить характеристики работы входного вала для каждой конфигурации СМТС.

ПрО имеет следующие характеристики:

- передаточное число от гидромотора до колеса, $i = 42,78$;
- КПД редукторной части, $\eta = 0,904$.

Зависимость радиуса колеса $r_{\text{кол}}$ СМТС Cometto MSPE EVO2 от осевой нагрузки $P_{\text{ос}}$ представлена на рис. 4.

В итоге определены показатели нагрузочных режимов работы входного вала для каждой конфигурации транспортера для трех случаев движения, представленные в табл. 3.

Применительно к трем случаям режимов работы входного вала для каждой конфигурации были построены логарифмические аппроксимации, которые будем использовать для определения показателей нагрузочных режимов работы входного вала для других нагрузочных режимов. На рисунках 5-9 представлены графики логарифмической аппроксимации с указанием уравнения сглаживания. На данных графиках приведена зависимость максимальной частоты вращения входного вала $N_{\text{вх_max}}$ от крутящего момента $M_{\text{кр_вх}}$.

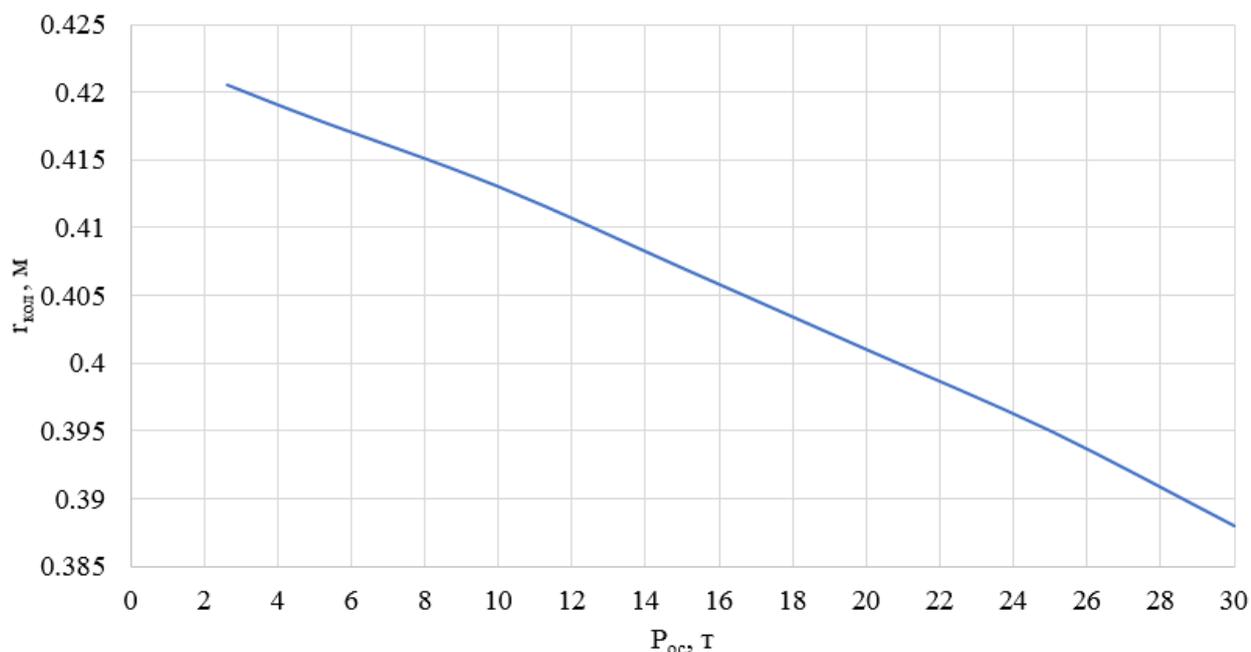


Рис. 4. Зависимость радиуса колеса Cometto MSPE EVO2 от осевой нагрузки

Таблица 3

Показатели нагрузочных режимов работы входного вала для каждой конфигурации транспортера и характерных случаев движения

Конфигурация	Количество ПрО, шт.	Случай движения СМТС	Крутящий момент $M_{кр_вх}$ на входном валу, Н·м	Частота вращения входного вала $N_{вх}$, об/мин	Мощность на входном валу, кВт
С1Р6а	4	1	21	4319	9,48
		2	221	2078	47,99
		3	646	966	65,21
С1Р12а, L1Р6а	8	1	18	3124	5,88
		2	221	1053	24,32
		3	646	468	31,59
С1Р18а	12	1	17	2081	3,70
		2	221	702	16,21
		3	646	322	21,74
С1Р24а, L1Р12а	16	1	17	1568	2,79
		2	221	527	12,17
		3	646	234	15,80
L1Р18а	24	1	17	1027	1,82
		2	221	351	8,11
		3	646	146	9,86

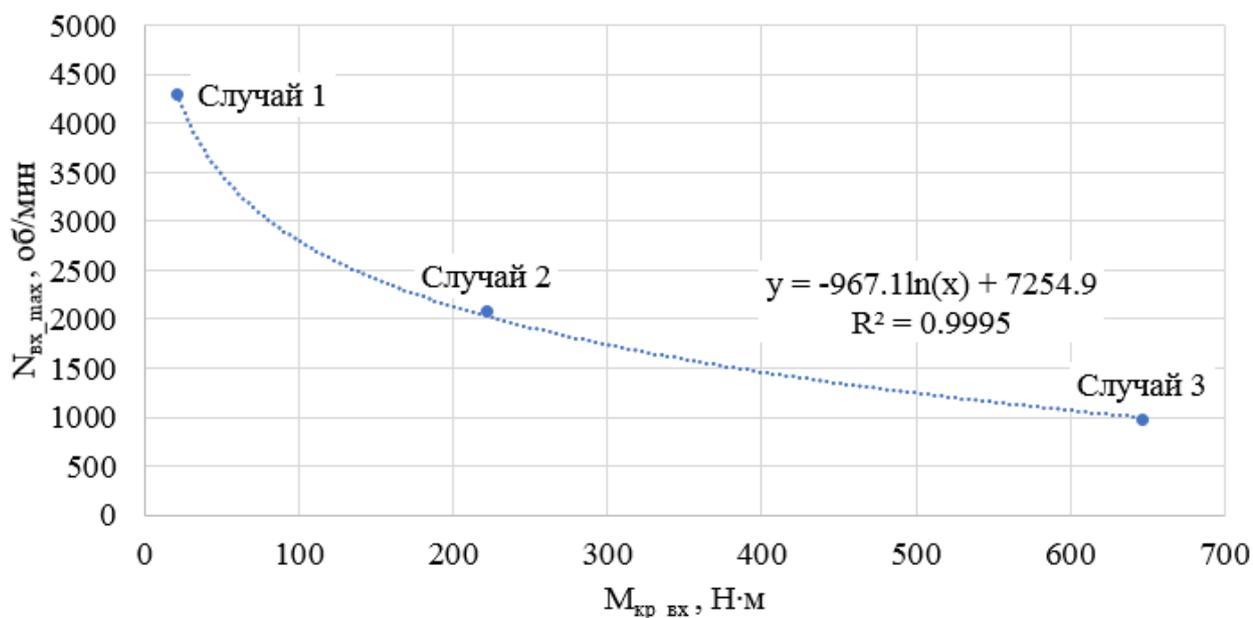


Рис. 5. Логарифмическая аппроксимация зависимости максимальной частоты вращения входного вала от крутящего момента на нем для конфигурации транспортера CIP6a

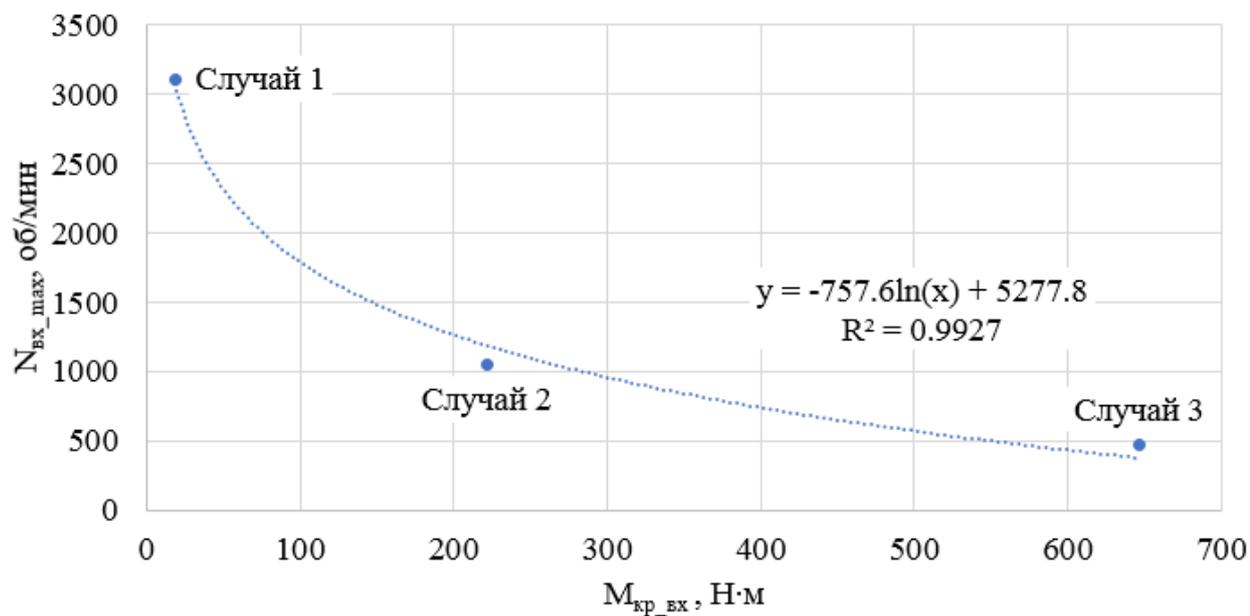


Рис. 6. Логарифмическая аппроксимация зависимости максимальной частоты вращения входного вала от крутящего момента на нем для конфигурации транспортера CIP12a, LIP6a

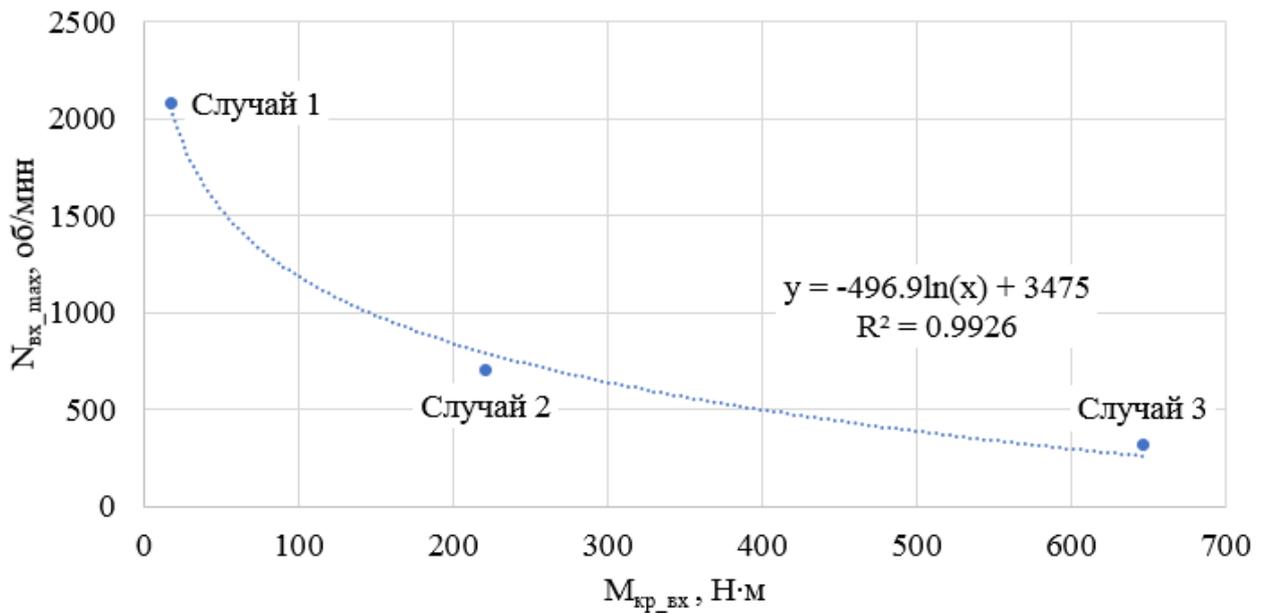


Рис. 7. Логарифмическая аппроксимация зависимости максимальной частоты вращения входного вала от крутящего момента на нем для конфигурации транспортера CIP18a

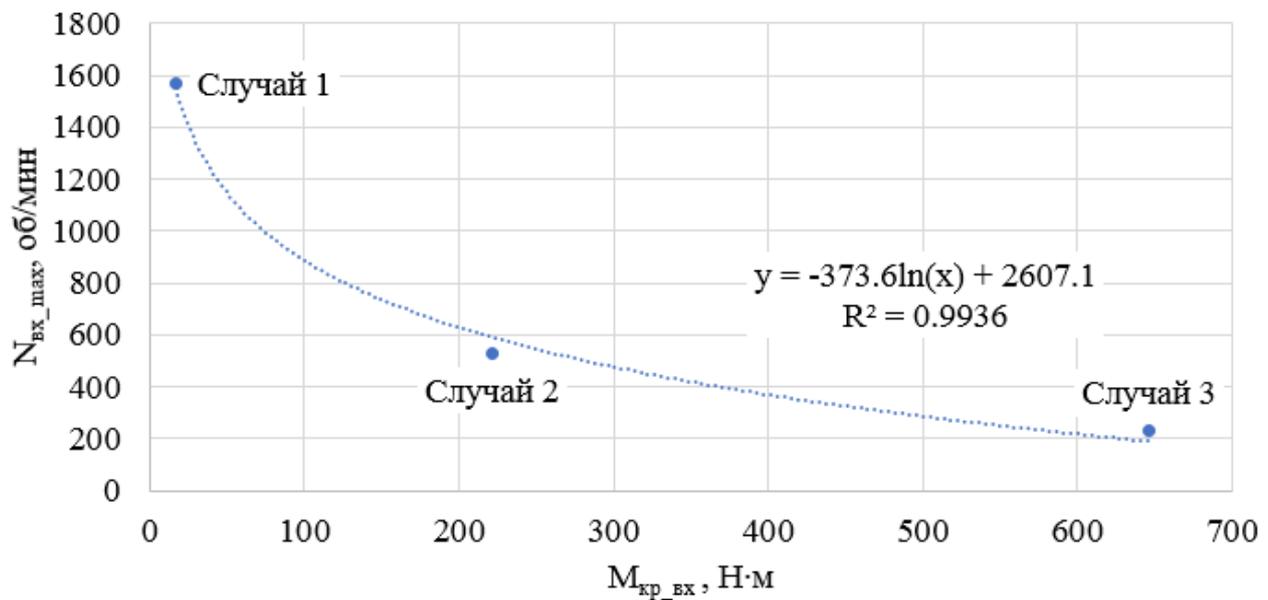


Рис. 8. Логарифмическая аппроксимация зависимости максимальной частоты вращения входного вала от крутящего момента на нем для конфигурации транспортера CIP24a, LIP12a

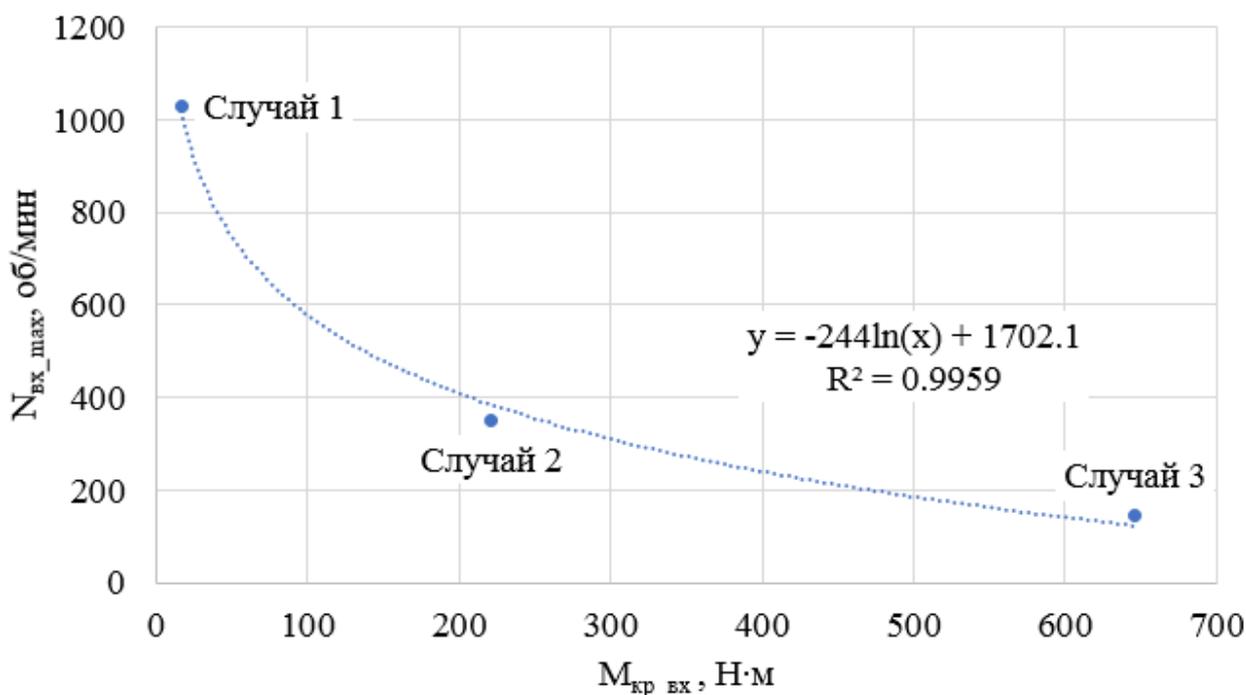


Рис. 9. Логарифмическая аппроксимация зависимости максимальной частоты вращения входного вала от крутящего момента на нем для конфигурации транспортера L1P18a

Результаты

Используя установленные зависимости значений максимальной частоты вращения входного вала PrO от крутящего момента на нем, были рассчитаны параметры работы СМТС для каждой конфигурации, представленные на рис. 10-14.

По результатам расчетов определена максимальная скорость V_{max} движения СМТС для каждой конфигурации в зависимости от нагрузочных условий (осевая нагрузка P_{oc} и продольный уклон дороги α). Осевая нагрузка включает в себя осевую нагрузку от перевозимого груза и порожнего ТС. При этом минимальная осевая нагрузка, равная 2,6 т, соответствует движению СМТС без груза.

С увеличением количества PrO снижается скорость движения СМТС при одинаковой осевой нагрузке и продольном уклоне дороги. Так, при количестве PrO 24 шт., скорость движения в среднем снижается на 83% относительно СМТС с 4 PrO . Это вызвано тем, что мощность гидронасоса

распределяется на большее число ПрО. Максимальное снижение скорости происходит при движении с наибольшей осевой нагрузкой и наибольшим продольным уклоном дороги.

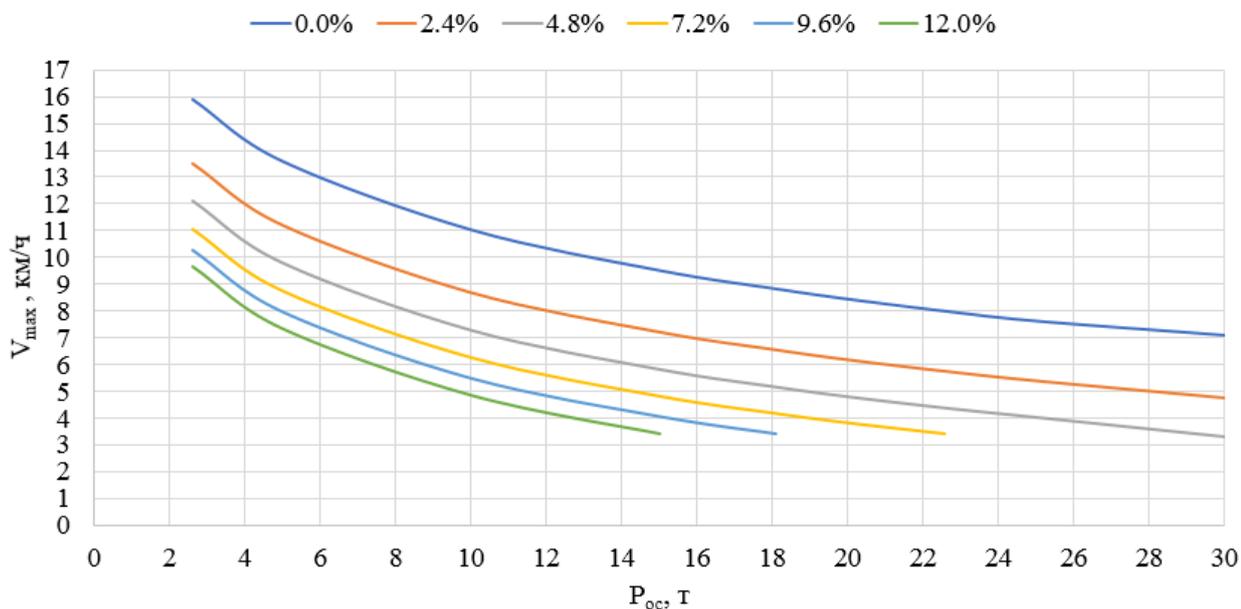


Рис. 10. Зависимость максимальной скорости движения СМТС Cometto Evo2 от осевой нагрузки и преодолеваемого продольного уклона для конфигурации С1Р6а

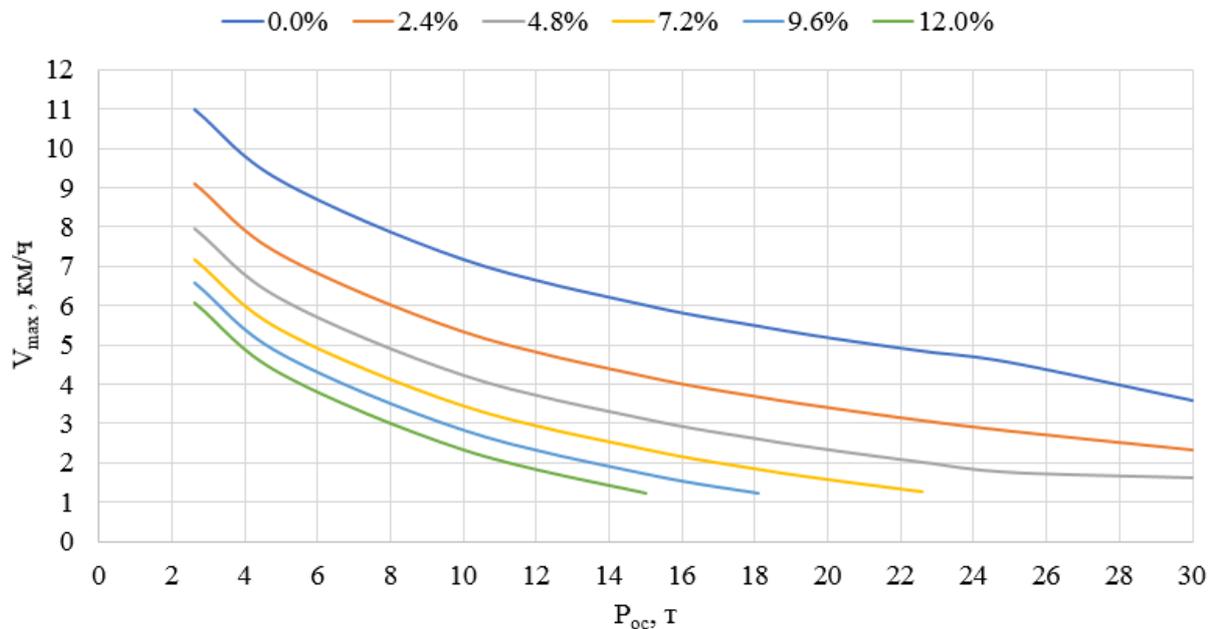


Рис. 11. Зависимость максимальной скорости движения СМТС Cometto Evo2 от осевой нагрузки и преодолеваемого продольного уклона для конфигурации С1Р12а, L1Р6а

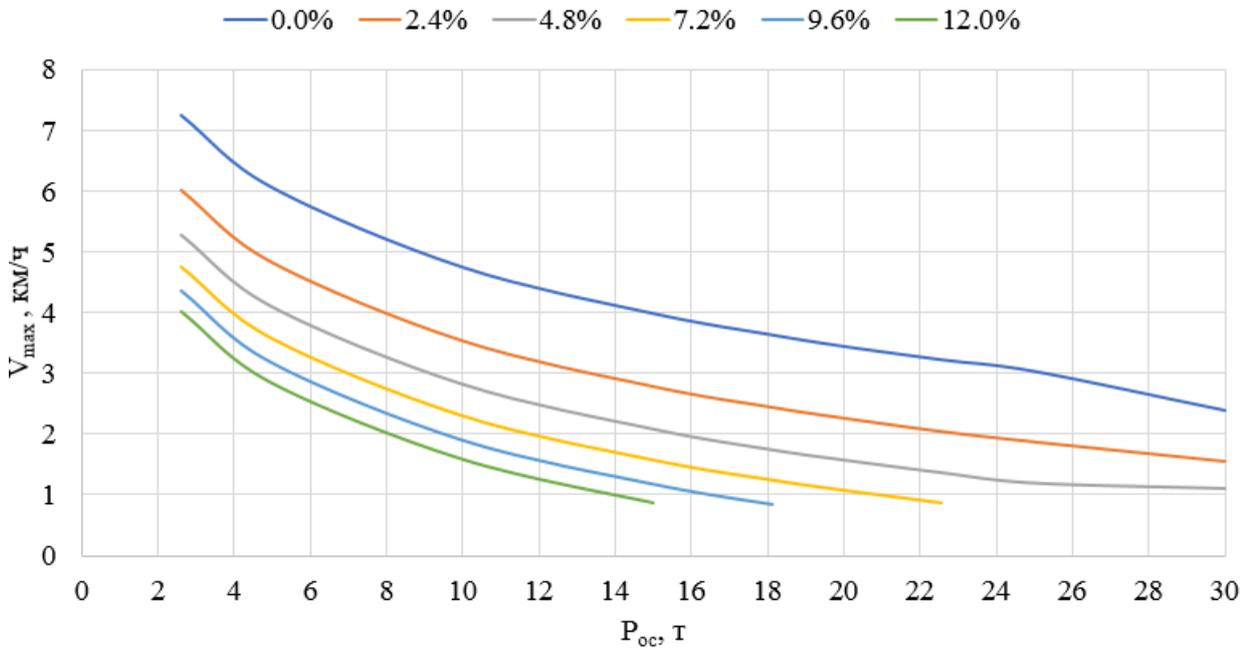


Рис. 12. Зависимость максимальной скорости движения СМТС Cometto Evo2 от осевой нагрузки и преодолеваемого продольного уклона для конфигурации C1P18a

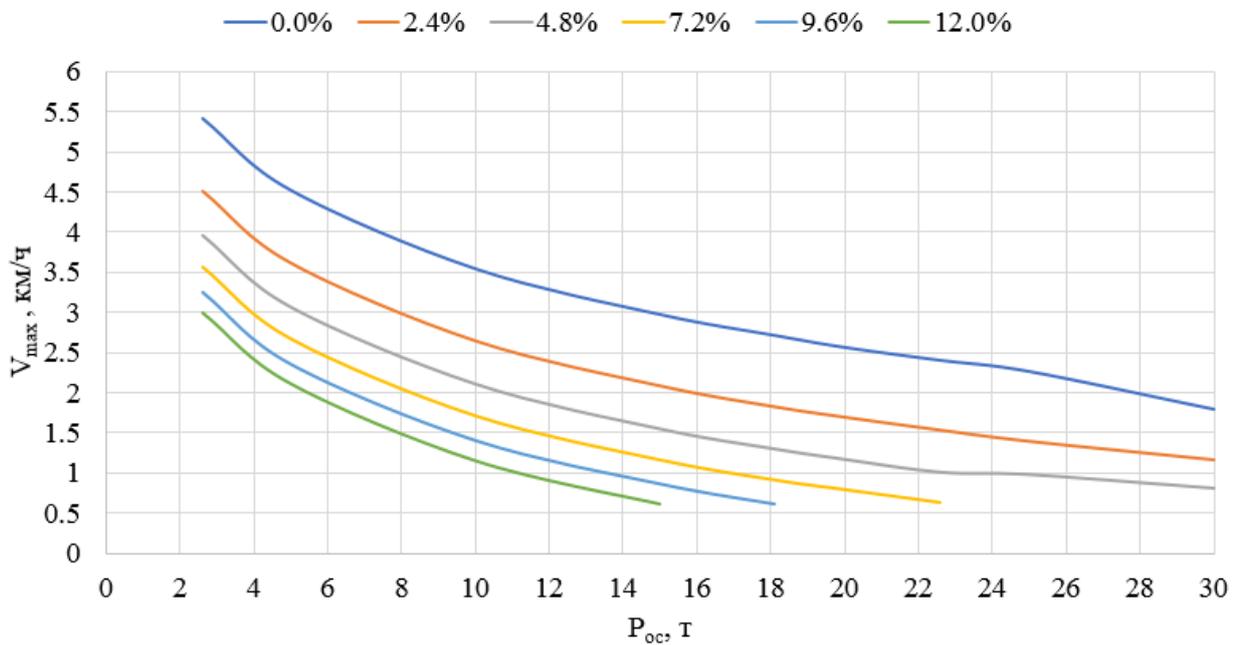


Рис. 13. Зависимость максимальной скорости движения СМТС Cometto Evo2 от осевой нагрузки и преодолеваемого продольного уклона для конфигурации C1P24a, L1P12a

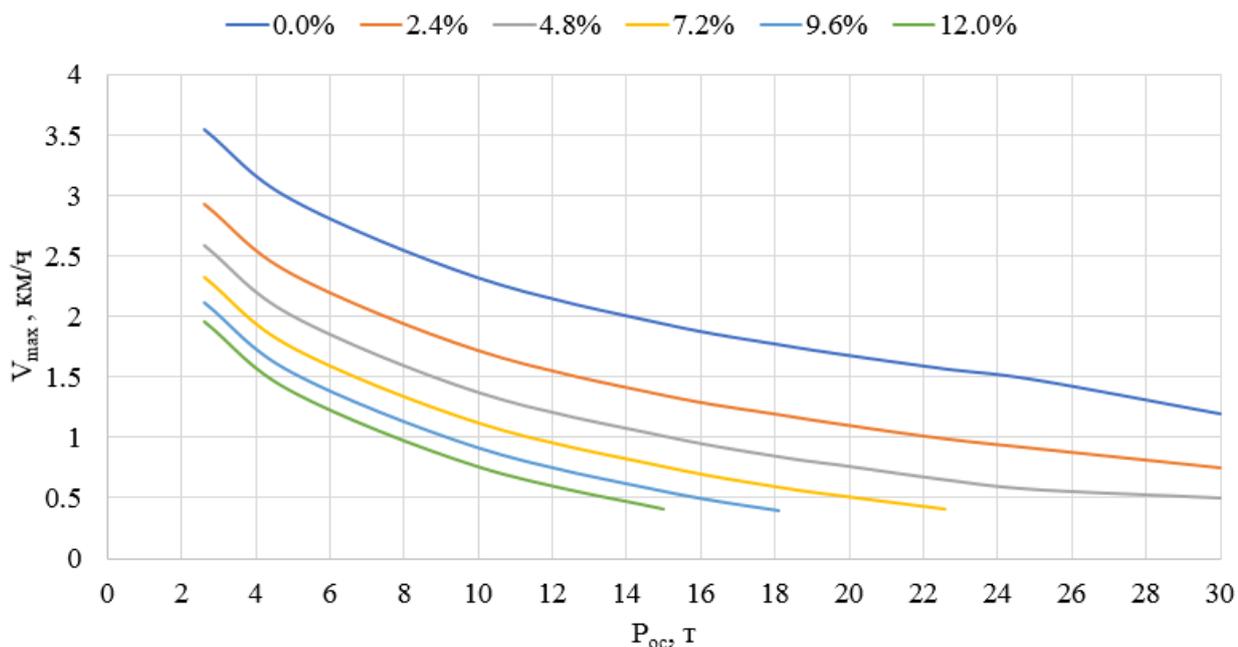


Рис. 14. Зависимость максимальной скорости движения СМТС Cometto Evo2 от осевой нагрузки и преодолеваемого продольного уклона для конфигурации L1P18a

Выводы

Пользуясь полученными зависимостями, можно выбрать необходимую конфигурацию СМТС для преодоления маршрута с известными характеристиками (продольный уклон) с конкретной массой груза. Так, при перевозке груза массой 480 т (осевая нагрузка 22,5 т) на конфигурации СМТС с 8 ПрО максимальный преодолеваемый уклон составляет 7,2%. Смена конфигурации на СМТС с 12 ПрО позволит увеличить максимальный преодолеваемый уклон до 11,3%.

На основе рассчитанных параметров работы СМТС может быть определено время прохождения маршрута перевозки, что позволит составить рациональный график движения и выбрать места отдыха на протяжении всего пути.

Список источников

1. Варламов, Л.А. Анализ существующих схем подвесок самоходных модульных транспортных средств с электронным управлением поворотом осей (серии

«MSPE») компании «Cometto» / Л.А. Варламов, М.А. Пузров // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2023. – № 1. – С. 53-64. – EDN YIODAE..

2. 07.097. Cometto MSPE EVO2. Самоходный модульный транспортер.

Руководство по электронной системе. – COMETTO INDUSTRIE. – 2011. – 141 с.

3. 14.187/A. Cometto MSPE EVO2. Самоходный модульный транспортер.

Конфигурации. – COMETTO INDUSTRIE. – 2014. – 30 с.

References

1. Varlamov L.A. Puzrov M.A. *Mashiny i ustanovki: proyektirovaniye, razrabotka i ekspluatatsiya*, 2023, no. 1, pp. 53-64.

2. 07.097. Cometto MSPE EVO2. *Samokhodnyy modul'nyy transporter. Rukovodstvo po elektronnoy sisteme* (07.097. Cometto MSPE EVO2. Self-propelled modular. Electronic manual), COMETTO INDUSTRIE, 2011, 141 p.

3. 14.187/A. Cometto MSPE EVO2. *Samokhodnyy modul'nyy transporter. Konfiguratsii* (14.187/A. Cometto MSPE EVO2. Self-propelled modular. Configurations), COMETTO INDUSTRIE, 2014, 30 p.

Рецензент: А.Г. Савельев, д-р техн. наук, проф., генеральный директор ООО «РСЦ»

Информация об авторах

Мидаков Алексей Владимович, аспирант, ИМАШ РАН.

Пузров Михаил Александрович, аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Тропин Сергей Львович, канд. техн. наук, доц., МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Мисинев Александр Николаевич, канд. техн. наук, ООО «ОКБ «Спецтяжпроект».

Information about the authors

Midakov Aleksei V., postgraduate, IMASH RAN.

Puzrov Mikhail A., postgraduate, BMSTU.

Tropin Sergey L., Ph.D., associate professor, BMSTU.

Misinev Alexander N., Ph.D., LLC «OKB «Spetstyazhproekt».

Статья поступила в редакцию 15.11.2023; одобрена после рецензирования 16.11.2023; принята к публикации 15.12.2023.

The article was submitted 15.11.2023; approved after reviewing 16.11.2023; accepted for publication 15.12.2023.