

УДК (UDC) 621.86

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ
МОБИЛЬНОЙ КАНАТНОЙ ДОРОГИDYNAMICS SIMULATION AND EXPERIMENTAL ANALYSIS
OF A MOBILE CABLE CAR BASE STATION'S MECHANICAL TRANSMISSIONSТаричко В.И.¹, Лагерев И.А.²
Tarichko V.I.¹, Lagerev I.A.²¹ – АО «Брянский автомобильный завод» (Брянск, Россия)² – Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)¹ – Bryansk Automobile Plant JSC (Bryansk, Russian Federation)² – Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. В статье представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований рабочих процессов трансмиссий базовых станций мобильных канатных дорог. Мобильные канатные дороги на базе специальных колесных или гусеничных шасси предназначены для перевозки грузов в сложных условиях. Рассмотрены основные схемы трансмиссий мобильных канатных дорог. Представлена математическая модель рабочих процессов трансмиссии. Выполнено сравнение результатов моделирования с использованием различных математических моделей. Для подтверждения адекватности представленной математической модели выполнены экспериментальные исследования редуктора трансмиссии колесного шасси высокой грузоподъемности.

Ключевые слова: мобильная канатная дорога, базовая станция, шасси, трансмиссия, динамика, моделирование, эксперимент.

Дата принятия к публикации: 07.03.2020
Дата публикации: 25.06.2020

Сведения об авторах:

Таричко Вадим Игоревич – кандидат технических наук, заместитель генерального директора – главный конструктор АО «Брянский автомобильный завод», e-mail: 32.6909@mail.ru.

Лагерев Игорь Александрович – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.

ORCID: 0000-0002-0921-6831.

Abstract. The article presents the results of simulation and experimental studies of the working processes of transmissions of base stations of mobile cable cars. Mobile cable cars based on special wheeled or tracked chassis are designed for transportation of goods in difficult conditions. Considered the basic scheme of the mobile transmission cable cars. The mathematical model of transmission working processes is presented. The results of modeling with the use of different mathematical models are compared. To confirm the adequacy of the presented mathematical model, experimental studies of transmission reducer of wheeled chassis of high load capacity were performed.

Keywords: mobile ropeway, base station, chassis, transmission, dynamics, simulation, experiment.

Date of acceptance for publication: 07.03.2020
Date of publication: 25.06.2020

Authors' information:

Vadim I. Tarichko – Candidate of Technical Sciences, Deputy general director – General designer, Bryansk Automobile Plant JSC, e-mail: 32.6909@mail.ru.

Igor A. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Vice rector for Innovations, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.

ORCID: 0000-0002-0921-6831

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук №МД-422.2020.8

Acknowledgements

The study was supported by President Grant for Government Support of Young Russian Scientists No. №MD-422.2020.8

1. Введение

Мобильные канатные дороги на базе различных мобильных машин предназначены для перевозки грузов и пассажиров через естественные и искусственные преграды (реки, овраги, болота) [1-4].

Привод исполнительных механизмов мобильных канатных дорог осуществляется через трансмиссию базовой машины. Наиболее перспективным является применение для привода мобильной канатной дороги комбинированной гидромеханической трансмиссии, в которой гидронасосы приводятся в движение от механической трансмиссии базовой машины через коробку отбора мощности. Такой подход получил широкое распространение для привода навесного оборудования автомобильных кранов, кранов манипуляторов, экскаваторов [5].

2. Структурные схемы трансмиссии мобильных канатных дорог

При исследовании рабочих процессов трансмиссии мобильных канатных дорог динамические процессы в двигателе базовой машины детально не рассматриваются. Двигатель внутреннего сгорания представлен в модели своей внешней скоростной характеристикой, которая представляет собой детерминированную зависимость крутящего момента M_D или мощности N_D от частоты вращения двигателя n_D [6]. Аналогичный подход используется и для моделирования работы электродвигателей в составе экспериментальных стендов.

В состав трансмиссий колесных базовых станций мобильных канатных дорог (рис. 1), передающих движение от двигателя внутреннего сгорания к движителю входят:

- сцепления, предназначенные для кратковременного отключения двигателя внутреннего сгорания от трансмиссии с целью переключения передач, подключения коробок отбора мощности, кратковременной остановки машины;
- коробки переключения передач, предназначенные для изменения передаточного соотношения трансмиссии с целью получения

оптимальных условий работы двигателя и трансмиссии при текущем режиме движения колесной машины;

- раздаточные коробки, предназначенные для деления потока мощности между осями колесной машины с несколькими (со всеми) ведущими осями;

- коробки отбора мощности, предназначенные для привода навесного оборудования (насосов гидросистем, лебедок, оборудования канатной дороги);

- главные передачи, предназначенные для повышения крутящих моментов на колесах машины при снижении скорости их вращения, обеспечения требуемых скоростей вращения колес при штатных режимах движения, а также для передачи крутящего момента от карданных валов к полуосям;

- передачи промежуточных мостов, предназначенные для привода колес промежуточного моста и передачи крутящего момента на последующий мост;

- карданные передачи, предназначенные для передачи крутящего момента между несоосными валами элементов трансмиссии, как правило расположенными на больших (по сравнению с размерами агрегатов трансмиссии) расстояниях.

Также в трансмиссии устанавливаются межколесные и межосевые дифференциалы. Первые из них, как правило, монтируются вместе с главными передачами, а вторые – с раздаточными коробками. Если полный привод задних колес является подключаемым, то вместо раздаточной коробки и межосевого дифференциала используется вязкая управляемая муфта. Неуправляемые ведущие колеса подключены к главным передачам с дифференциалами с помощью полуосей. Управляемые колеса – через шарниры угловых скоростей.

Механическая часть гидромеханической трансмиссии привода оборудования Мобильной канатной дороги выглядит следующим образом (рис. 2). Отбор мощности для привода канатной дороги выполняется через коробку отбора мощности, установленную на коробке переключения передач или на раздаточной коробке базовой машины. При этом базовая машина неподвижна.

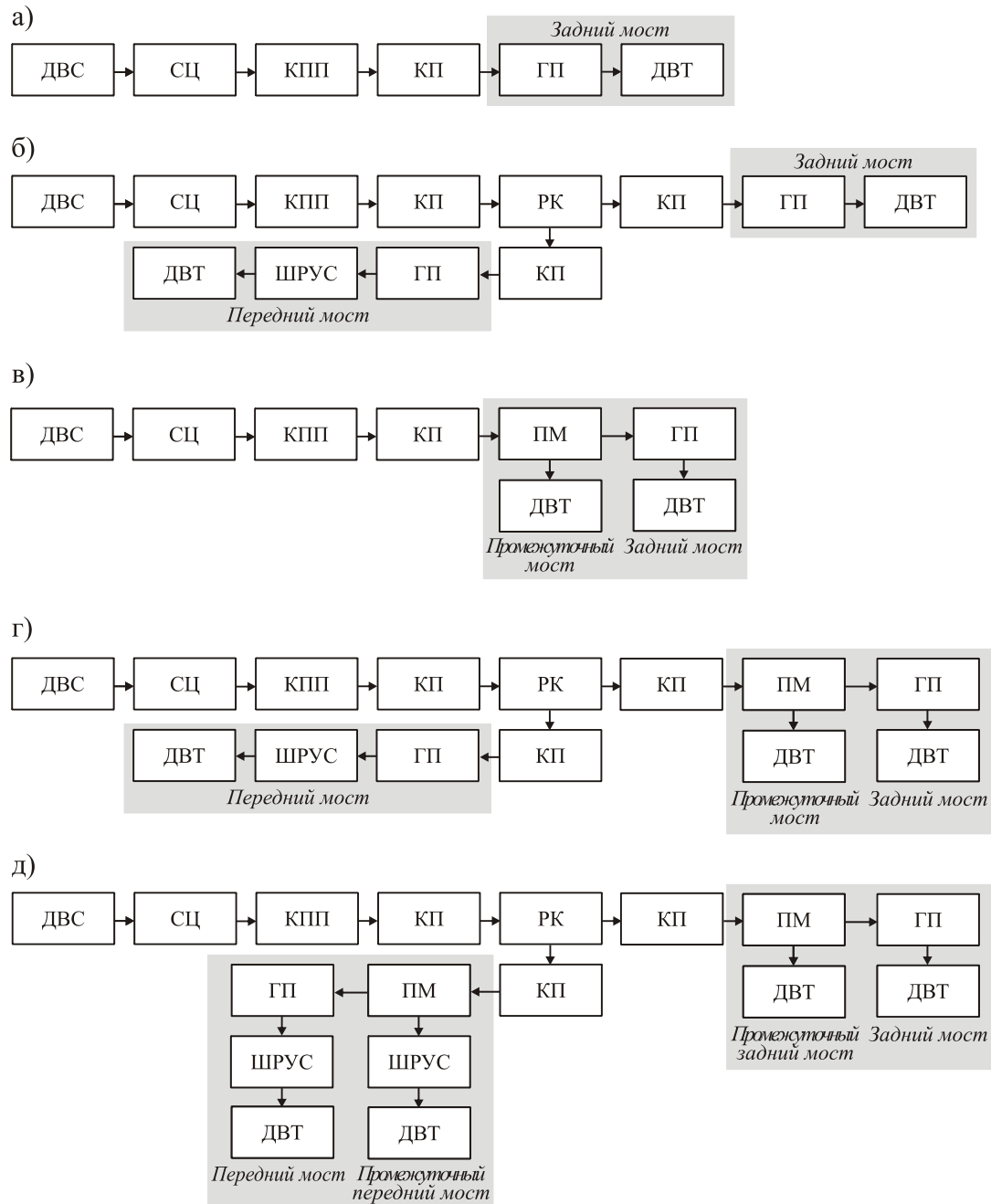


Рис. 1. Структурные схемы механической трансмиссии базовой станции мобильной канатной дороги на колесном шасси: а – шасси 4х2; б – шасси 4х4; в – шасси 6х4; г – шасси 6х6; д – шасси 8х8; ДВС – двигатель внутреннего сгорания; СЦ – сцепление; КПП – коробка переключения передач; РК – раздаточная коробка; КП – карданная передача; ГП – главная передача; ШРУС – шарнир равных угловых скоростей; ПМ – передача промежуточного моста; ДВТ – движитель

От коробки отбора мощности приводятся в движение гидронасосы (гидронасос) гидропривода оборудования канатной дороги и аутригеров базового шасси.

Привод канатной дороги может также включать в себя коробку передач оборудования канатной дороги, раздаточную коробку

оборудования канатной, рычажные механизмы. В составе привода канатной дороги также должен быть механический тормоз. Гидропривод может приводить в движение вспомогательное оборудование для загрузки и разгрузки мобильной канатной дороги (краны-манипуляторы, конвейеры и т.п.).

На судах и железнодорожном транспорте отсутствует возможность подключения к основной трансмиссии базовой машины, в основном, из-за значительного удаления двигателя от места установки оборудования мобильной канатной дороги. Поэтому для его привода необходимо устанавливать отдельный двигатель и трансмиссию. При этом двигатель подключается к входу привода канатной дороги, который должен содержать коробку переключения передач (рис. 2, в), а использование гидропривода не обязательно.

Следует отметить, что у конкретной базовой машины трансмиссия может отличаться от схем, приведенных на рис. 2. Однако это не носит принципиального значения, так как разработанная математическая модель является универсальной. Тем более, что при работе канатной дороги базовая машина неподвижна, а, значит, не действует часть трансмиссии, отвечающая за движение базовой машины (расположенная после места отбора мощности на привод канатной дороги), и в расчетах может не рассматриваться.

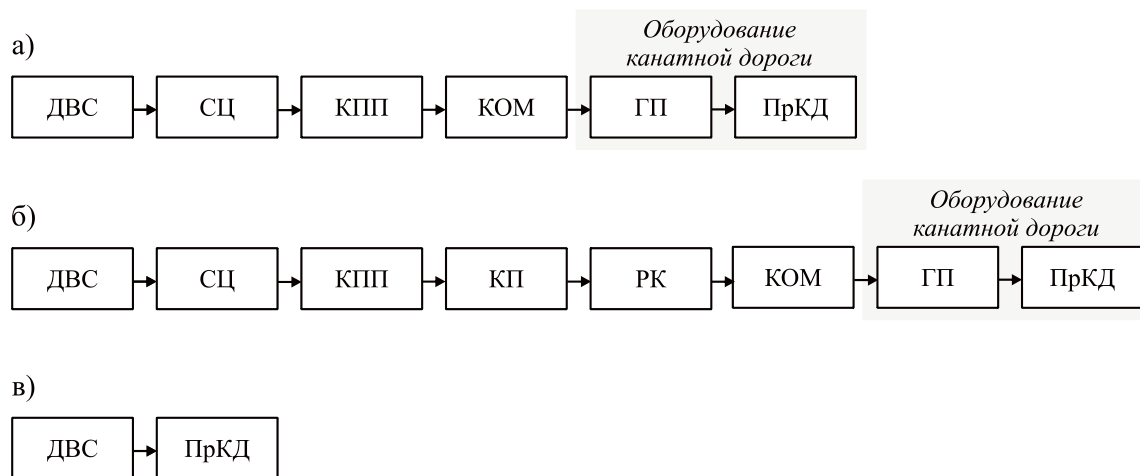


Рис. 2. Структурные схемы гидромеханической трансмиссии привода оборудования мобильной канатной дороги: а – отбор мощности через коробку отбора мощности, установленную на коробке переключения передач; б – отбор мощности через раздаточную коробку, установленную на коробке переключения передач; в – собственный привод мобильной канатной дороги (механическая трансмиссия); ПрКД – привод канатной дороги; ГП – гидравлическая часть гидромеханической трансмиссии

3. Математическое моделирование динамики механической части трансмиссии базовой станции мобильной канатной дороги

Целью работы является разработка и экспериментальная верификация математической модели для исследования динамики механической части трансмиссии базовой станции мобильной канатной дороги. Соответствующие модели гидравлической части трансмиссии будут разработаны в ходе дальнейших исследований.

Расчетная схема для построения математической модели механической части транс-

миссии приводной базовой станции мобильной канатной дороги показана на рис. 3. Она представляет собой совокупность инерционных вращающихся элементов, соединенных упруго-диссипативными связями. Крутящий момент M_{D0} передается через сцепление от двигателя к исполнительным механизмам мобильной канатной дороги (гидронасосу или напрямую к механическому приводу канатной дороги).

Математическая модель механической части трансмиссии учитывает процессы преобразования зубчатыми передачами частоты вращения и крутящего момента [7].

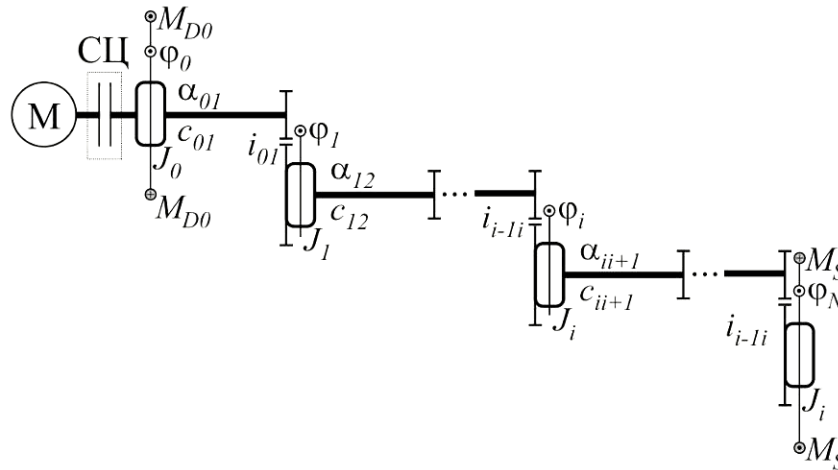


Рис. 3. Расчетная схема механической трансмиссии приводной базовой станции:
 М – двигатель; СЦ – сцепление [7]

Выражения (1) представляют собой уравнения движения отдельных частей системы, с помощью которых исследуется динамика механической трансмиссии.

$$\begin{cases}
 J_0 \ddot{\varphi}_0 + c_{01} \left(\varphi_0 - \frac{\varphi_1}{i_{01}} \right) + \alpha_{01} \left(\dot{\varphi}_0 - \frac{\dot{\varphi}_1}{i_{01}} \right) = M_{D0}; \\
 J_1 \ddot{\varphi}_1 + c_{12} \left(\varphi_1 - \frac{\varphi_2}{i_{12}} \right) + \alpha_{12} \left(\dot{\varphi}_1 - \frac{\dot{\varphi}_2}{i_{12}} \right) - \frac{c_{01}}{i_{01}} \left(\varphi_0 - \frac{\varphi_1}{i_{01}} \right) - \frac{\alpha_{01}}{i_{01}} \left(\dot{\varphi}_0 - \frac{\dot{\varphi}_1}{i_{01}} \right) = 0; \\
 \dots \\
 J_i \ddot{\varphi}_i + c_{ii+1} \left(\varphi_i - \frac{\varphi_{i+1}}{i_{ii+1}} \right) + \alpha_{ii+1} \left(\dot{\varphi}_i - \frac{\dot{\varphi}_{i+1}}{i_{ii+1}} \right) - \frac{c_{i-1i}}{i_{i-1i}} \left(\varphi_{i-1} - \frac{\varphi_i}{i_{i-1i}} \right) - \frac{\alpha_{i-1i}}{i_{i-1i}} \left(\dot{\varphi}_{i-1} - \frac{\dot{\varphi}_i}{i_{i-1i}} \right) = 0; \\
 \dots \\
 J_N \ddot{\varphi}_N - \frac{c_{N-1N}}{i_{N-1N}} \left(\varphi_{N-1} - \frac{\varphi_N}{i_{N-1N}} \right) - \frac{\alpha_{N-1N}}{i_{N-1N}} \left(\dot{\varphi}_{N-1} - \frac{\dot{\varphi}_N}{i_{N-1N}} \right) = -M_S,
 \end{cases} \quad (1)$$

где $i=0 \dots N$ – порядковый номер элемента трансмиссии; J_i – момент инерции i -го элемента трансмиссии, приведенный к его входному валу; φ_i – угол поворота i -го элемента трансмиссии; c_{ij} – крутильная жесткость элемента трансмиссии; α_{ij} – коэффициент вязкости элемента трансмиссии; M_{D0} – движущий момент, передаваемый от двигателя на входное звено трансмиссии через сцепление; M_S – момент сопротивления, создаваемый приводимыми в движение исполнительными механизмами или насосами гидравлической части гидромеханической трансмиссии оборудования канатной дороги; i_{ij} – передаточные значения элементов трансмиссии ($i_{ij} < 1$) [7].

В ряде работ [8, 9] при составлении уравнений движения (1) не учитываются передаточные числа. Считается, что динамические составляющие передаваемых моментов на ведущем и ведомом валу равны, а передаточные отношения влияют только на кинематику трансмиссии.

Справедливость использования данного подхода проанализируем на примере трехмассовой системы со следующими параметрами: $J_0=2000$ кг·м²; $J_1=5000$ кг·м²; $J_2=10000$ кг·м²; $c_{01}=10$ кН/м; $c_{12}=20$ кН/м; $\alpha_{01}=50$ Н·с/м; $\alpha_{12}=50$ Н·с/м; $M_{D0}=1000$ Нм; $M_S=995$ Нм; $i_{01}=i_{12}=0,6$. Результаты моделирования динамики передачи с учетом и без учета передаточных чисел трансмиссии показаны на рис. 4 [7].

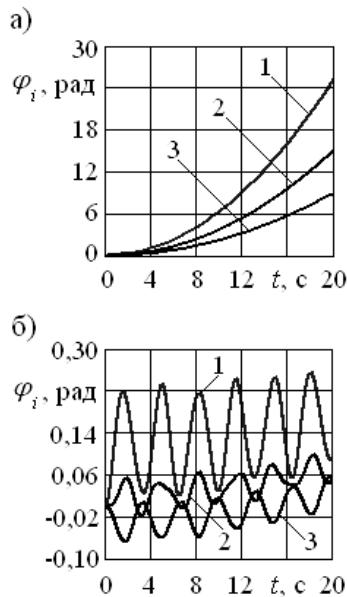


Рис. 4. Сравнение подходов к моделированию динамики трансмиссии:
 а – результаты моделирования с учетом передаточных чисел трансмиссии;
 б – результаты моделирования без учета передаточных чисел трансмиссии;
 1 – φ_0 ; 2 – φ_1 ; 3 – φ_2 [7]

Согласно полученным результатам моделирования, если не учитываются передаточные числа трансмиссии, то при отсутствии существенного запаса движущего момента M_{D0} над моментом сопротивления M_S привод не может сдвинуть трансмиссию с места, так как не происходит повышение момента. В результате энергия двигателя расходуется в большей степени не на разгон вращающихся частей (рис. 4, а), а на колебательные движения (рис. 4, б) [7].

4. Экспериментальные исследования динамики механической части трансмиссии базовой станции мобильной канатной дороги

Для подтверждения адекватности представленной математической модели выполнены экспериментальные исследования редукторов трансмиссии колесного шасси.

Схема использованного испытательного стенда для одноступенчатого редуктора показана на рис. 5.

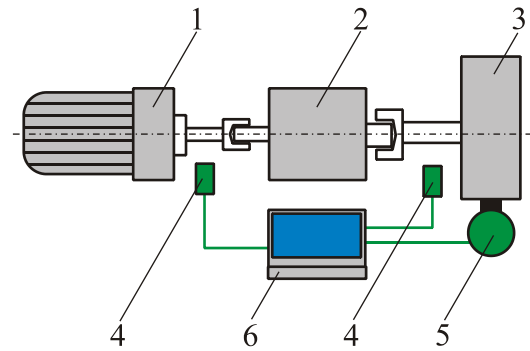


Рис. 5. Схема испытательного стенда:
 1 – электродвигатель; 2 – испытуемый редуктор; 3 – нагрузочное устройство;
 4 – датчики числа оборотов;
 5 – силоизмерительное устройство;
 6 – измерительная система

Методика испытаний составлена с учетом рекомендаций [10]. Измерительная система позволяет зафиксировать скорости вращения и моменты на первичном и вторичном валу редуктора в процессе разгона и работы в номинальном режиме. Момент на первичном валу редуктора определяется согласно известной скоростной характеристике электродвигателя.

Выполнено моделирование рабочих процессов в данном редукторе с использованием модели (1). Расчетная схема редуктора показана на рис. 6.

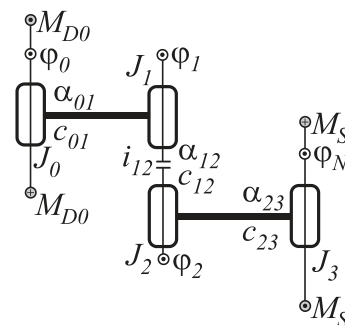


Рис. 6. Расчетная схема редуктора

Были приняты следующие параметры расчетной схемы: $J_0=0,019$ кг·м²; $J_1=0,036$ кг·м²; $J_2=0,0999$ кг·м²; $J_3=0,167$ кг·м²; $c_{01}=1165$ кН/м; $c_{12}=500$ кН/м; $c_{23}=855$ кН/м; $\alpha_{01}=3$ Н·с/м; $\alpha_{12}=1$ Н·с/м; $\alpha_{23}=3$ Н·с/м; $M_S = 215$ Нм; $i_{12} = 0,298$.

Уравнения движения системы выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} J_0 \ddot{\varphi}_0 + c_{01}(\varphi_0 - \varphi_1) + \alpha_{01}(\dot{\varphi}_0 - \dot{\varphi}_1) = M_{D0}(\dot{\varphi}_1); \\ J_1 \ddot{\varphi}_1 + c_{12} \left(\varphi_1 - \frac{\varphi_2}{i_{12}} \right) + \alpha_{12} \left(\dot{\varphi}_1 - \frac{\dot{\varphi}_2}{i_{12}} \right) - \\ - c_{01}(\varphi_0 - \varphi_1) - \alpha_{01}(\dot{\varphi}_0 - \dot{\varphi}_1) = 0; \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 + c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) + \alpha_{23}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - \\ - \frac{c_{12}}{i_{12}} \left(\varphi_1 - \frac{\varphi_2}{i_{12}} \right) - \frac{\alpha_{12}}{i_{12}} \left(\dot{\varphi}_1 - \frac{\dot{\varphi}_2}{i_{12}} \right) = 0; \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 - c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) - \alpha_{23}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) = -M_s. \end{cases}$$

Закон изменения $M_{D0}(\dot{\varphi}_1)$ определяется силовой характеристикой электродвигателя. Чем выше скорость вращения, тем ниже движущий момент. Номинальная мощность электродвигателя 13 кВт. Максимальный крутящий момент 387 Нм.

Результаты экспериментальных и расчетных исследований показаны на рис. 7 и рис. 8.

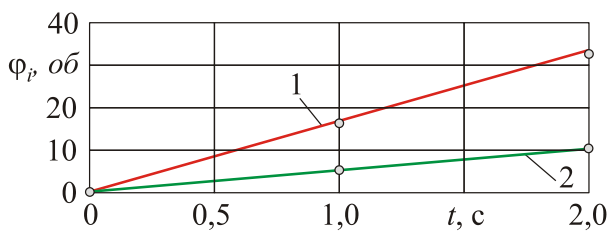


Рис. 7. Изменение угла поворота валов:

- 1 – первичного вала редуктора (φ_1);
- 2 – вторичного вала редуктора (φ_2);
- – результаты моделирования;
- – результаты эксперимента

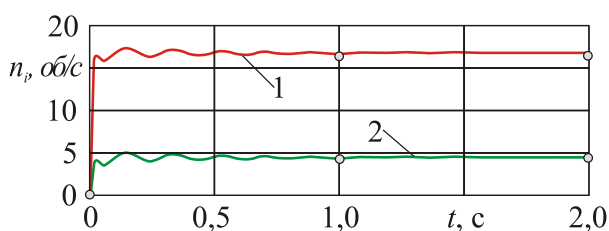


Рис. 8. Изменение скорости вращения валов:

- 1 – первичного вала редуктора ($\dot{\varphi}_1$);
- 2 – вторичного вала редуктора ($\dot{\varphi}_2$);
- – результаты моделирования;
- – результаты эксперимента

5. Основные выводы

Анализ результатов исследования позволяет сделать следующие выводы.

1. Наиболее перспективным видом привода мобильных канатных дорог является гидромеханическая трансмиссия, в которой гидронасосы приводятся в движение от механической трансмиссии базовой машины через коробку отбора мощности.

2. Для исследования рабочих процессов механической части трансмиссии используются математические модели, представляющие собой уравнения движения инерционных элементов, соединенных упруго-диссипативными связями. Анализ литературных источников показал, что исследователями используются математические модели, учитывающие и не учитывающие передаточные отношения передач трансмиссии.

3. Экспериментальные исследования показали необходимость учета передаточных чисел передач (рис. 4, рис. 7). В противном случае, при решении уравнений (1) энергия двигателя расходуется в большей степени не на разгон вращающихся частей, а на колебательные движения относительно положения равновесия. В реальной трансмиссии такой процесс приводил бы к буксованию сцепления или остановке двигателя.

4. Погрешность моделирования динамики механической части трансмиссии МКД с использованием предложенной математической модели составляет: не более 1% по перемещениям, 2% по частоте процесса.

5. В ходе дальнейших исследований будет смоделирована динамика трансмиссии мобильной канатной дороги с учетом гидравлической части.

6. Результаты исследования будут использованы при исследовании рабочих процессов инновационных канатных транспортных систем [11].

Список литературы

1. Патент № 2337023 Мобильная подвесная канатная дорога / Короткий А.А., Хальфин М.Н., Маслов В.Б. № 2007102705/11; заявл. 24.01.2007; опубл. 27.10.2008. Бюл. № 30.
2. Патент 2465423 Стадион / Короткий А.А., Приходько В.М. Кустарев Г.В.; № 2011112660/03; заявл. 01.04.2011; опубл. 27.10.2012, Бюл. № 30.
3. Лагереv А.В., Таричко В.И., Солдатчиков С.П. Обеспечение общей устойчивости базовых колесных станций мобильных канатных дорог // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 210-220. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-210-220>.
4. Лагереv И.А., Таричко В.И., Солдатчиков С.П., Игнатов Д.А. Создание экспериментального макета мобильной канатной дороги с использованием 3Д-печати // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 221-230. – DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-221-230>.
5. Вайнсон А.А. Подъемно-транспортные машины / А.А. Вайнсон. М.: Машиностроение, 1989. 536 с.
6. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля СПб.: БВХ-Петербург, 2006. 478 с.
7. Таричко В.И. Анализ подходов к моделированию динамики механических передач транспортных машин // Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Энергоресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях». Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. С. 261-265.
8. Имангулов А.Р., Филькин Н.М. Об упрощении динамической модели трансмиссии гибридного легкового автомобиля // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. №2. С. 55-57.
9. Лелиовский К.Я., Макаров В.С. Исследование вибраций трансмиссии при движении автомобиля по дорогам различного микропрофиля // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева. 2013. № 4. С. 98-103.

References

1. Patent RU 2337023, B61B 7/00. Mobilnaya podvesnaya kanatnaya doroga [Mobile ropeway]. Korotkiy A.A., Khalphin M.N., Maslov V.B. Published 27.10.2008. (In Russian)
2. Patent RU 2465423, E04H 3/14. Stadion [Stadium]. Korotkiy A.A., Prihodko V.M., Kustarev G.V. Published 27.10.2012. (In Russian)
3. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P. General stability of a base vehicle of a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 210-220. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-210-220 (In Russian)
4. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P., Ignatov D.A. The experimental model creation of a mobile ropeway by 3D-printing. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 221-230. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-221-230 (In Russian)
5. Vaison A.A. *Pod'emno-transportnye mashiny Veroyatnostnaya teoriya mekhanicheskoy erozii* [Lifting and transport machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 536 p. (In Russian)
6. Tarasik V.P. *Teoriya dvijeniya avtomobilya* [Automobile moving theory]. Sankt-Petersburg, BVKh-Peterburg, 2006. 478 p. (In Russian)
7. Tarichko V.I. Analysis of approaches to modeling dynamics of mechanical transmissions of transport vehicles. *Proc. of International scientific and technical conference "Energy-saving technologies and equipment in the road and construction industries"*, 2019, No.2, pp. 261-265. (In Russian)
8. Imangulov A.R. About simplification of dynamic model of transmission of the hybrid car. *Intellektualnie sistemy v proizvodstve*, 2013, No.2, pp. 55-57. (In Russian)
9. Leliovsky K.Ya. Study of transmission vibrations when driving a car on the roads of various microprofiles. *Trudy Nijegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva*, 2013, No.4, pp. 98-103. (In Russian)

10. Лагеров А.В. Нагруженность подъемно-транспортной техники. Брянск: БГТУ, 2010. 180 с.

11. Лагеров А.В., Лагеров И.А., Короткий А.А., Панфилов А.В. Концепция инновационной системы городского транспорта «Канатное метро города Брянска» // Вестник Брянского государственного технического университета. 2012. №3. С. 12-15.

‡
‡
‡
‡
‡
‡
‡
10. Lagerev A.V. *Nagruzhennost podemno-transportnoy tekhniki* [Load lifting and transport equipment]. Bryansk, BGTU, 2010. 180 p. ISBN 978-5-89838-497-5 DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1306614> (In Russian)

‡
‡
‡
‡
‡
‡
‡
11. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Korotkiy A.A., Panfilov A.V. Innovation transport system “Bryansk rope metro”. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, No. 3, pp. 12-15. (In Russian)