

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ПРИВОДА ВЕДУЩИХ КОЛЕС ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ С БОРТОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПОВОРОТОМ

Добрецов Р.Ю.¹, Канинский А.О.¹, Загидуллин Р.Р.², Войнаш С.А.², Соколова В.А.³, Андронов А.В.⁴, Алексеева С.В.⁵

¹*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург;*

²*Казанский федеральный университет, Казань;*

³*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна;*

⁴*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова;*

⁵*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург*

Ключевые слова: гусеничная машина, трансмиссия, механизм передачи и поворота, подвижность, управляемость, устойчивость движения.

Аннотация. Рассмотрены принципы подхода к построению структуры электромеханического модуля, выполняющего функции механизма передачи и поворота гусеничной машины, определению его внешних параметров и переходу к конкретной кинематической схеме. Предложена обобщенная структурная схема механической части модуля, перечислены основные внешние параметры, не зависящие от конкретной кинематической схемы механизма, и рассмотрены принципы их определения. Синтез кинематической схемы осуществляется на основе принципов проектирования кинематических схем планетарных редукторов с двумя степенями свободы. Показано родство между такими механизмами и управляемыми механизмами распределения мощности в трансмиссиях колесных машин. Рассмотрены режимы работы предлагаемого механизма. Предложенное в качестве иллюстрации схемное решение представляется перспективным для использования при проектировании шасси гусеничных машин малой и особо малой категории по массе.

DESIGN OF AN ELECTROMECHANICAL DRIVE MODULE FOR THE TRACKED VEHICLE'S SPROCKETS

Dobretsov R.Yu.¹, Kaninskii A.O.¹, Zagidullin R.R.², Voinash S.A.², Sokolova V.A.³, Andronov A.V.⁴, Alekseeva S.V.⁵

¹*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg;*

²*Kazan Federal University, Kazan;*

³*Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design;*

⁴*Saint-Petersburg State Forest Technical University;*

⁵*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg*

Keywords: tracked vehicle, transmission, power distribution mechanism, mobility, controllability, stability.

Abstract. The principles of the approach to constructing the structure of an electromechanical module that performs the functions of a transmission and turning mechanism of a tracked vehicle, determining its external parameters and transition to a specific kinematic scheme are considered. A generalized block diagram of the mechanical part of the module is proposed, the main external parameters that do not depend on the specific kinematic scheme of the mechanism are listed, and the principles of their determination are considered. The synthesis of the kinematic scheme is carried out on the basis of the principles of designing the kinematic schemes of planetary gearboxes with two degrees of freedom. The relationship between such mechanisms and controlled mechanisms of power distribution in transmissions of wheeled vehicles is shown. The modes of operation of the proposed mechanism are considered. The schematic solution proposed as an illustration seems to be promising for use in the design of the chassis of tracked vehicles of a small and extra small mass category.

Введение

Можно констатировать, что в настоящее время не только сформулирована важная проблема для серийно выпускаемых и эксплуатируемых транспортных и транспортно-технологических гусеничных машин (относительно низкое качество управления поворотом и низкая энергоэффективность дешевых в производстве механизмов поворота [1]), но и обозначены основные пути решения – применение двухпоточных механизмов передачи и поворота (МПП), включающих в себя гидростатическую передачу или механический (или электромеханический) трансформирующий механизм [1, 2], а также принцип использования контроля над буксованием фрикционных элементов управления на бортах [1, 2].

При конструировании легких и особо легких гусеничных машин различного назначения (выполнение боевых задач, решение топографических задач и экологический мониторинг, заготовка недревесных материалов, автономные транспортные системы и др.) возникает потребность в поиске новых технических решений и в рациональной интеграции уже известных подходов. Таким образом, целью исследования является повышение качества управления поворотом гусеничных машин.

Основные задачи работы: предложить принципы построения электромеханического модуля, выполняющего функции механизма передачи и поворота (МПП) гусеничной машины и удовлетворяющего современным требованиям в области кинематических характеристик МПП; сформулировать подходы к определению основных параметров такого МПП и способ получения конкретных кинематических схем устройства, отвечающего за распределение мощностей между ведущими колесами; проанализировать универсальность предлагаемых решений и указать в первом приближении на конструкторско-технологические возможности, необходимые для разработки и производства модуля.

Материалы и методы исследований

Объекты исследования – шасси транспортных и транспортно-технологических гусеничных машин, используемых в различных областях (транспорт, военное дело, лесозаготовительная промышленность, сельское хозяйство).

Методологическая основа исследования – базовые подходы теории гусеничных машин; расчетные методы, используемые при проектировании узлов и агрегатов трансмиссий гусеничных машин.

Результаты исследований

Современные тенденции в области создания электромеханических трансмиссий гусеничных машин подразумевают в первую очередь либо использование ведущих мотор-колес [3], либо принцип последовательного гибрида [1]. Построение параллельных и последовательно-параллельных гибридов может быть оправдано для основных танков [4] и машин на основе их шасси. Во всех этих случаях не идет речи о создании унифицированного электромеханического модуля, родственного моноблоку «двигатель-трансмиссия» и имеющего преимущества компактности, модульности, простоты замены в полевых условиях.

Основными тенденциями современных требований заказчиков можно назвать реверсивность трансмиссии (или получение не менее двух передач заднего хода), обеспечение поворота с нулевым радиусом, улучшение плавности изменения радиуса поворота и использование в качестве механизма управления трансмиссией штурвала, а не рычагов.

Удовлетворение этим требованиям при модернизации трансмиссий серийных основных танков с бортовыми коробками передач представляется возможным за счет установки бортового реверса. Для вновь создаваемых машин легкой весовой категории целесообразно рассмотреть возможность использования центрального МПП.

В этом случае рациональным принципом представляется использование технологии низкочастотной широтно-импульсной модуляции давления (ШИМД) в гидравлическом приводе управления дисковыми тормозами МПП, при этом, обратная связь в замкнутой системе управления осуществляется по угловой скорости поворота [2].

Структура модуля схематически представлена на рисунке 1.

Объект управления родственен механизмам распределения мощности колесных машин [5], однако потребуется обеспечить традиционные требования к кинематике МПП [6-8], принцип реверсивности трансмиссии и поворот с нулевым радиусом. На рисунке 1 представлена обобщенная структура МПП, удовлетворяющая этим постулатам. В качестве источника энергии может использоваться тяговый электрический двигатель (для машин малой массы) или гибридная силовая установка (для средних машин и шасси основных танков).

Кинематические и силовые особенности МПП определяются условиями движения и параметрами шасси и не зависят от конкретной схемы МПП.

Реализуемый относительный радиус поворота ρ и потребное межбортовое передаточное отношение $u = V_2/V_1$ (здесь V_2 и V_1 – линейные скорости забегающего и отстающего бортов) связаны зависимостями [8]:

$$\rho = 0,5(u+1)/(u-1) \text{ и } u = (\rho+0,5)/(\rho-0,5).$$

Относительному расчетному радиусу $\rho = 2,78$ соответствует межбортовое передаточное отношение $u(\rho) = 1,44$.

Необходимые силовые соотношения следуют из баланса мощности МПП [8] или из традиционной теории движения гусеничных машин [7].

Таким образом, можно говорить о внешних параметрах, которым должен удовлетворять МПП для обеспечения нужных эксплуатационных характеристик: плавное изменение межбортового передаточного отношения в заданном диапазоне и обеспечение необходимых для поворота сил тяги на гусеницах бортов. Таковыми внешними параметрами являются межбортовое передаточное отношение на характерных режимах движения:

- поворот с расчетным (фиксированным) радиусом за счет использования элементов управления МПП (в рассматриваемом примере $u_1 = 1,44$ при $\rho_1 = 2,78$);
- поворот с расчетным (фиксированным) радиусом за счет использования элементов управления МПП (в рассматриваемом примере $u_2 = \infty$ при $\rho_2 = 0,5$);
- поворот с нулевым радиусом (формально этот радиус также является расчетным, так как реализуется без буксования в фрикционных элементах МПП) $u_3 = (-1)$ при $\rho_3 = 0$;
- прямолинейное движение $u_0 = 1$ при $\rho_0 = \infty$.

Основной МПП является центральный механизм распределения мощности. Очевидно, что его необходимо выполнить планетарным. Обобщенная схема такого механизма представлена на рисунке 2. Кинематическая схема дистрибутивной части такого механизма получена на основе традиционных подходов к синтезу планетарных передач с двумя степенями свободы [6, 9].

Редукторная часть в зависимости от характеристик ТЭД может иметь одно или два передаточных числа. Двухрежимные редукторы часто предпочтительны для снижения установочной мощности ТЭД.

Передаточные отношения режимов определяются по зависимостям [10,11]:

$$u_I = \max \left\{ V_{\min} / (r_{\text{БК}} \omega_{\text{ТЭД min}} u^* u_{\text{БР}}), mg \varphi r_{\text{БК}} / (M_{\text{ТЭД max}} u^* u_{\text{БР}}) \right\};$$

$$u_{II} = \min \left\{ V_{\max} / (r_{\text{БК}} \omega_{\text{ТЭД max}} u^* u_{\text{БР}}), mg f_{\min} r_{\text{БК}} / (M_{\text{ТЭД max}} u^* u_{\text{БР}}) \right\}.$$

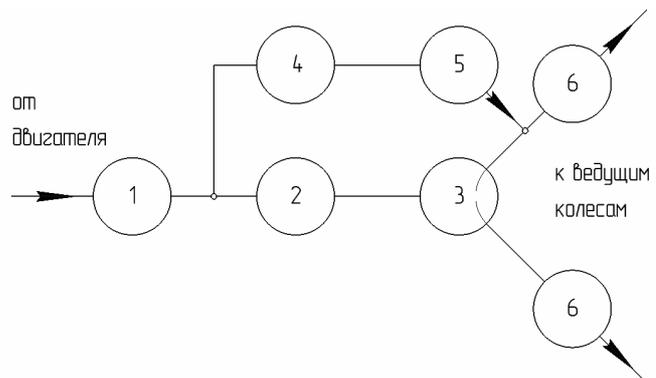


Рис. 1. Упрощенная структура электромеханического модуля привода ведущих колес: 1 – понижающий редуктор; 2,5 – промежуточные зубчатые передачи; 3 – дифференциал с элементами управления; 4 – механизм распределения мощности; 6 – бортовые редукторы; тормоза бортов условно не показаны

Использованы обозначения: $V_{\max(\min)}$ – максимальная и минимальная скорости шасси; $r_{\text{вк}}$ – радиус ведущего колеса; $\omega_{\text{ТЭД max(min)}}$ и $M_{\text{ТЭД max(min)}}$ – максимальная и минимальная угловая скорость и момент на валу ТЭД; u^* – передаточное число редукторной части МПП на данном режиме работы; $u_{\text{бр}}$ – передаточное число бортового редуктора; m – масса шасси; g – ускорение свободного падения; f_{\min} и ϕ – коэффициенты сопротивления качению (минимальное значение в заданных условиях движения) и сцепления с грунтом.

Одним из вариантов решения о выборе кинематической схемы механизма является схема, представленная на рисунке 2.

Электромеханический модуль обеспечивает следующие режимы работы:

- прямолинейное движение, дифференциальный привод (движение неустойчиво, полностью включены T_1 или T_2 и муфта C_0);

- прямолинейное движение, заблокированный привод (движение устойчиво, полностью включены T_1 или T_2 и муфта C_1);

- поворот в диапазоне радиусов от бесконечности до расчетного (МПП работает, как на режиме прямолинейного движения, тормоз $T_{3(4)}$ работает в режиме ШИМД);

- поворот с расчетным радиусом (МПП работает, как на режиме прямолинейного движения, тормоза T_0 и $T_{3(4)}$ включены полностью);

- поворот в диапазоне радиусов от $\rho_1 = 2,78$ до $\rho_2 = 0,5$ (остановочный тормоз отстающего борта буксует);

- поворот с расчетным радиусом $\rho_2 = 0,5$ (остановочный тормоз отстающего борта включен полностью);

- поворот с нулевым радиусом $\rho_3 = 0$ (тормоза T_0 и $T_{3(4)}$ включены полностью);

- задний ход (обеспечивается за счет реверса ТЭД, элементы управления МПП используются так же как и на прямом ходу);

- стоянка (включены элементы T_0 , C_0 , C_1);

- буксировка (все элементы управления отключены).

В рассматриваемом примере секция поворачивает с минимальным относительным радиусом $\rho = 2,78$. Такое значение позволяет гарантировать, что с возможностью рекуперации мощности будут реализованы значения $\rho = 3 \dots 4$, характерные для холостого хода транспортно-технологических машин. Меньшие радиусы можно скомпенсировать за счет поворота на месте.

Представляется, что электромеханический модуль может быть востребован в первую очередь на компактных высокоманевренных необитаемых гусеничных платформах, но также может использоваться на малогабаритном колесном шасси, реализующим принцип бортового управления поворотом.

Два модуля такого типа могут входить в состав трансмиссии монокорпусной четырехгусеничной платформы [12] или использоваться в электромеханической трансмиссии двух или многосекционной гусеничной машины, в составе колесного автопоезда с активным прицепным звеном и др.

Для машин легкой и средней категории по массе, предназначенных для продолжительной работы, модуль может быть включен в состав гибридной силовой установки. В случае последовательного гибрида конструкция модуля изменений не

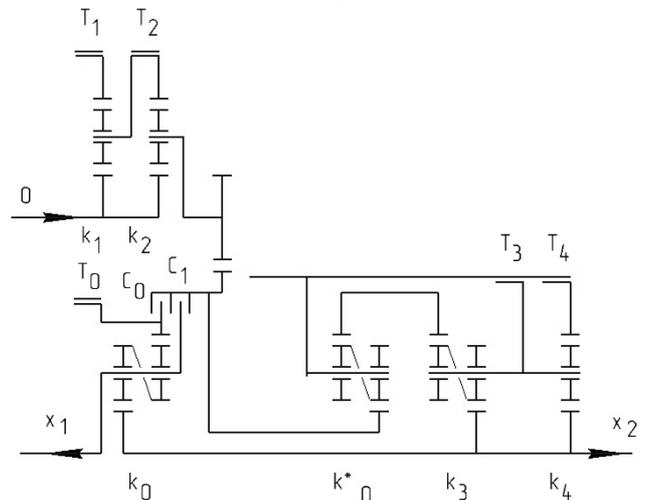


Рис. 2. Упрощенная кинематическая схема механической части модуля: 0, x_1 и x_2 – входное и выходные звенья редукторной части;

$T_{0,1...4}$ – тормоза; $C_{0,1}$ – блокирующие муфты; $k_{0,1...4}$ – кинематические параметры планетарных рядов

потребуется. При использовании параллельного и параллельно-последовательного гибридов на редуктор 1 (см. рис. 1) возлагается дополнительная функция управления потоками мощности от теплового и электрического двигателей и его кинематическая схема усложняется. Этот достаточно сложный вопрос требует отдельного рассмотрения и выходит за рамки задач данного исследования.

Выводы

1. Кинематика механизма позволяет обеспечить поворот во всей гамме радиусов, востребованной для гусеничных машин, в том числе – поворот с нулевым радиусом.

2. Используемая методика позволяет оценить значения установочной мощности двигателей и передаточные отношения редуктора в цепи электрического двигателя.

3. Можно говорить об универсальности применения: рассмотренные подходы возможно использовать при построении трансмиссий гусеничных и колесных машин, в том числе – одноосных тягачей.

Заключение

Проектирование рассмотренного модуля может быть осуществлено на основе опыта в области разработки планетарных коробок передач для транспортных гусеничных машин. Необходимые для производства технологии и материалы также освоены отечественной промышленностью.

Список литературы

1. Гусев М.Н., Зайцев В.А., Куртц Д.В. Концепция и основные положения рационального выбора и обоснования параметров гибридной силовой установки для унифицированного базового шасси нового поколения // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Бронетанковая техника и вооружение. Труды тринадцатой Всерос. НПК. Том 3. – М.: Издание РАН, 2010. – С. 28-32.
2. Демидов Н.Н., Добрецов Р.Ю., Медведев М.С. Фрикционные механизмы поворота в двухпоточных трансмиссиях транспортных гусеничных машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2019. – №1. – С. 60-69.
3. Артемьев А.В., Гайдук В.Д., Пичахчи С.В., Шаманов Д.В., Добрецов Р.Ю. Перспективная легкая гусеничная роботизированная платформа // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Бронетанковая техника и вооружение. Труды XXV Всерос. НПК. Том 3. – М.: Издание РАН, 2022. – С. 419-426.
4. Демидов Н.Н., Добрецов Р.Ю., Лозин А.В., Филипов А.Н. Выбор схемного варианта построения трансмиссий военных машин с гибридной силовой установкой // Сборник статей НПК «Разработка и использование электрических трансмиссий для образцов вооружения и военной техники (ОАО «ВНИИТрансмаш»)». – СПб.: Издание ОАО «ВНИИТрансмаш», 2016. – С. 87-100.
5. Патент №2763002 РФ. Механизм распределения мощности в трансмиссии транспортного средства / Р.Ю. Добрецов, А.Г. Семенов, А.И. Васильев, А.О. Канинский, Д.Э. Телятников, И.А. Комаров. – Заявка №2021124995 от 23.08.2021; опубл. 24.12.2021, Бюл. №36.
6. Носов Н.А., Харченко А.П., Галышев В.Д. Расчет и конструирование гусеничных машин: Учебник для вузов / Под ред. Н.А. Носова. – Ленинград: Машиностроение, 1972. – 559 с.
7. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.
8. Шеломов В.Б., Добрецов Р.Ю. Мощности двигателя и буксования фрикционного элемента управления поворотом гусеничной машины // Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия «Наука и образование». – 2010. – №2, Т. 2 – С. 87-91.
9. Харитонов С.А. Автоматические коробки передач. – М.: ООО «Изд-во Аристель», ООО «Изд-во АСТ», 2003. – 335 с.
10. Поршнев Г.П., Добрецов Р.Ю., Красильников А.А. Трансмиссия с электромеханической передачей для тракторов и дорожно-строительных машин // Известия МГТУ МАМИ. – 2020. – №2(44). – С. 33-41.
11. Патент №2741850 РФ. Способ увеличения тягового класса трактора или дорожно-строительной машины на его шасси и устройство для его осуществления (варианты) / Р.Ю. Добрецов, А.Г. Семенов. – Заявка № 2020115242 от 30.04.2020; опубл. 29.01.2021; Бюл. №4.
12. Лозин А.В., Добрецов Р.Ю. Концепция электромеханической трансмиссии для четырехгусеничной машины // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XXV Всероссийской научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 432-436.

References

1. Gusev M.N., Zaitsev V.A., Kurtz D.V. The concept and main provisions of the rational choice and justification of the parameters of a hybrid power plant for a new generation unified base chassis // Actual problems of protection

- and safety. Armored vehicles and weapons. Proceedings of the thirteenth All-Russia. NPK. Vol. 3. – M.: RARAN edition, 2010. – P. 28-32.
2. Demidov N.N., Dobretsov R.Yu., Medvedev M.S. Friction turning mechanisms in two-line transmissions of transport tracked vehicles // Tractors and agricultural machines. 2019, no. 1, pp. 60-69.
 3. Artemyev A.V., Gaiduk V.D., Pichakhchi S.V., Shamanov D.V., Dobretsov R.Yu. Perspective light tracked robotic platform // Actual problems of protection and safety. Armored vehicles and weapons. Proceedings of XXV Vseros. NPK. Vol. 3. – M.: Publ. house RARAN, 2022. – P. 419-426.
 4. Demidov N.N., Dobretsov R.Yu., Lozin A.V., Filippov A.N. The choice of a schematic option for constructing transmissions of military vehicles with a hybrid power plant // Collection of articles by NPK "Development and use of electric transmissions for weapons and military equipment (OJSC VNIITransmash)" – SPb.: Publication of JSC "VNIITransmash", 2016. – P. 87-100.
 5. Patent No. 2763002 RU. The mechanism of power distribution in the transmission of a vehicle / R.Yu. Dobretsov, A.G. Semenov, A.I. Vasiliev and others; applicant. – Appl. no. 2021124995 from 08/23/2021; publ. 12/24/2021, Bull. No. 36.
 6. Nosov N.A., Kharchenko A.P., Golyshev V.D. Calculation and design of tracked vehicles: Textbook for universities. – Leningrad: Mechanical Engineering, 1972. – 559 p.
 7. Zabavnikov N.A. Fundamentals of the theory of transport tracked vehicles. – M.: Mechanical Engineering, 1975. – 448 p.
 8. Shelomov V.B., Dobretsov R.Yu. Engine power and slippage of the friction control element for the rotation of the tracked vehicle // Scientific and technical bulletin of SPbPU, series "Science and Education". 2010, no. 2, vol. 2, pp. 87-91.
 9. Kharitonov S.A. Automatic transmissions. – M.: Aristel Publ. house LLC, AST Publ. house LLC, 2003. – 335 p.
 10. Porshnev G.P., Dobretsov R.Yu., Krasilnikov A.A. Transmission with electromechanical transmission for tractors and road-building machines // Proceedings of MSTU MAMI. 2020, no. 2(44), pp. 33-41.
 11. Patent No. 2741850 RU. A method for increasing the traction class of a tractor or road-building machine on its chassis and a device for its implementation (options) / R.Yu. Dobretsov, A.G. Semenov. – Appl no. 2020115242 from 04/30/2020; publ. 01/29/2021, Bull. No. 4.
 12. Lozin A.V., Dobretsov R.Yu. The concept of an electromechanical transmission for a four-track vehicle // Actual problems of protection and safety. Proceedings of the XXV All-Russian Scientific and Practical Conference. – Saint-Petersburg, 2022. – P. 432-436.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Добрецов Роман Юрьевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры	Dobretsov Roman Yurievich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department
Канинский Андрей Олегович – аспирант	Kaninskii Andrei Olegovich – postgraduate student
Загидуллин Рамиль Равильевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры конструктивно-дизайнерского проектирования	Zagidullin Ramil Ravilevich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of structural and design engineering
Войнаш Сергей Александрович – ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальная мобильность»	Voinash Sergey Alexandrovich – leading engineer of the research laboratory "Intellectual mobility"
Соколова Виктория Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств	Sokolova Victoria Alexandrovna – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of automation of technological processes and production
Андронов Александр Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта	Andronov Alexander Vyacheslavovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of forest engineering, service and repair
Алексеева Светлана Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры математики	Alekseeva Svetlana Vladimirovna – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of mathematics
sergey_voi@mail.ru	

Получена 29.11.2022