

УДК 629.114.026

Волонцевич Д.О., д-р техн. наук; Веретенников Е.А., канд. техн. наук;  
Костяник И.В., канд. техн. наук; Пасечный С.С.; Воронцов С.Н., канд. техн. наук;  
Пылева Т.К., канд. техн. наук

## К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ ПЛАНЕТАРНОЙ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ БРОНЕТРАНСПОРТЕРА БТР-4

**Введение.** Существующая схема трансмиссии колесных бронетранспортеров серии БТР-4 содержит комплексную гидродинамическую передачу ГТК – XV от БМП-3, работающую совместно с двигателем ЗТД-3, пятиступенчатую планетарную коробку передач (ПКП), двухступенчатую раздаточную коробку, главные передачи и колесные редуктора (рис. 1). При проведении заводских стендовых и полигонных испытаний и опытной эксплуатации бронетранспортеров разработчиками были получены определенные замечания, связанные с жесткой динамикой переключения ряда передач.

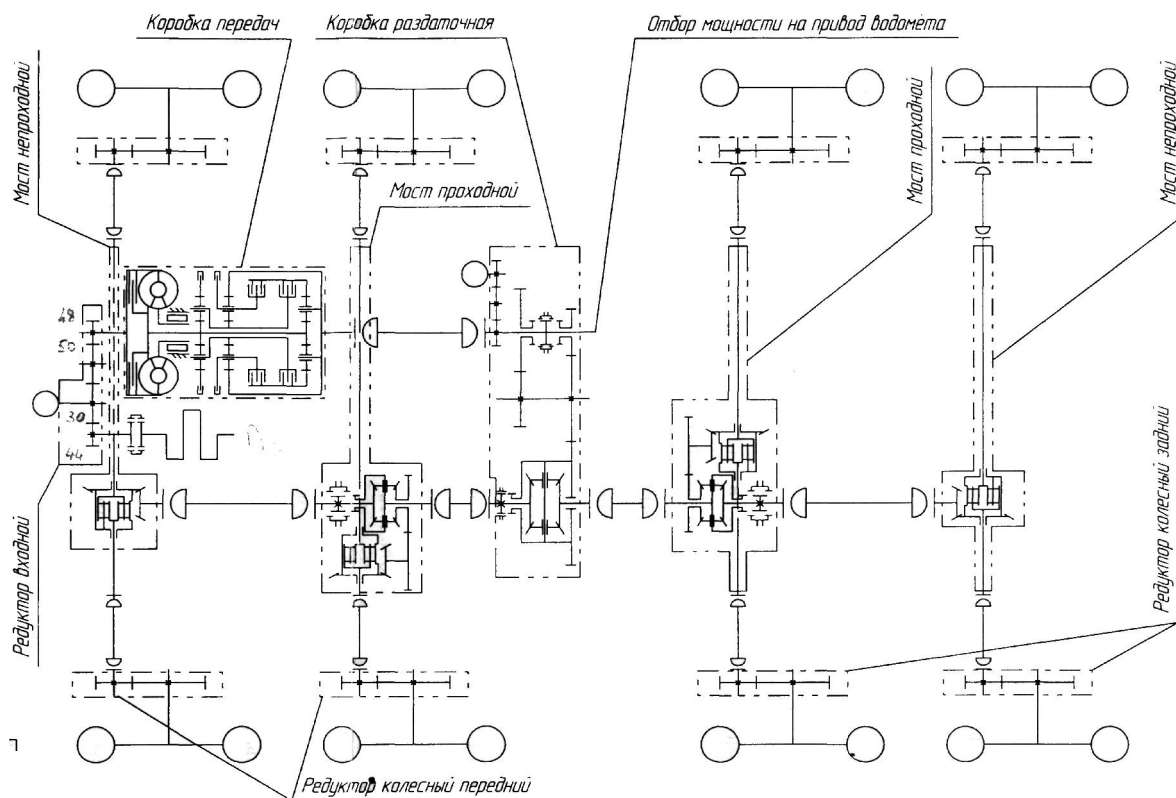


Рис.1. Кинематическая схема трансмиссии БТР-4

В связи с этой проблемой, отсутствием в доступных источниках действенных рекомендаций по разбивке передаточных отношений трансмиссий для военной техники и разработкой авторами статьи методики комплексной оценки динамичности военных гусеничных и колесных машин [1], опробованной на примере разработки ПКП БМ «Оплот», в качестве цели представленной работы было сформулировано следующее.

**Целью** представленной работы является определение передаточных отношений ПКП, оптимальных с точки зрения максимальной динамики разгона колесного бронетранспортера БТР-4Е в различных дорожных условиях.

© Д.О. Волонцевич, 2014

### **Обзор литературных источников.**

В настоящее время в литературе описаны и используются в расчетах много различных способов разбивки передаточных чисел трансмиссий и способы их коррекции [2-15]. Однако для военной колесной техники, которая эксплуатируется как на хороших дорогах с твердым покрытием, так и на полном бездорожье, при условии приоритетности тягово-скоростных показателей по сравнению с топливно-экономическими и экологическими проблематично использовать наработки, ориентированные на легковые и грузовые автомобили общетранспортного назначения.

### **Постановка задачи.**

Для двигателя ЗТД-3, работающего совместно с комплексной гидродинамической передачей ГТК – XV от БМП-3, выходная характеристика которых представлена на рис. 2, штатных главных передач и колесных редукторов в составе колесного бронетранспортера БТР-4Е подобрать оптимальные значения ПКП и раздаточной коробки, обеспечивающие наиболее быстрый разгон на внешней характеристике двигателя в различных дорожных условиях.

### **Материалы исследований.**

В качестве исходных были выбраны все необходимые массово-инерционные, геометрические и кинематические параметры, соответствующие штатному исполнению колесного бронетранспортера БТР-4Е. Были рассмотрены варианты пяти и шестиступенчатых ПКП в сочетании с двухступенчатой раздаточной коробкой. При этом было принято, что на «нормальном» диапазоне в раздаточной коробке машина должна уверенно двигаться, в том числе, и с заблокированным ГТК по дорогам с твердым покрытием, сухим грунтовыми дорогам и мокрым грунтовыми дорогам средней тяжести с коэффициентом сопротивления до 0,08, а также преодолевать подъемы по сухой грунтовой дороге с коэффициентом сопротивления до 0,04 и уклоном до 10°. При наличии высшей прямой передачи в ПКП и сохранении передаточного отношения нормального ряда в раздаточной коробке для обеспечения максимальной скорости движения передаточное отношение первой передачи в ПКП должно быть не менее шести.

Для пяти и шестиступенчатых ПКП были рассмотрены варианты с тремя степенями свободы с произвольным набором передаточных отношений. Одним из наиболее сложно преодолимых препятствий при синтезе работоспособной компактной схемы ПКП с тремя степенями свободы является ограничение скорости вращения сателлитов и разомкнутых фрикционов системы управления. Возможным вариантом решения этой проблемы являются схемы с последовательным редуцированием, содержащие входной реверс-делитель и основную 3-х ступенчатую ПКП. Однако такие варианты не позволяют получить более прогрессивные технические решения с произвольным законом распределения передаточных отношений по всему выбранному кинематическому диапазону. Для того чтобы понять насколько далеко от оптимального решения по динамике такой подход нас уводит, было принято решение провести дополнительно оптимизационные расчеты для шестиступенчатых ПКП с последовательным редуцированием, выполненных по принципу «3+3». Этот вариант для последовательного редуцирования является более предпочтительным, так как позволяет только один раз в процессе разгона одновременно переключать сразу два управляющих элемента при переходе с III передачи на IV, а так же реализовывать набор из трех передач для движения задним ходом с возможностью плавного последовательного переключения и разгона.

Необходимость рассмотрения старта не только с первой, а и со второй или даже третьей передачи в процессе оптимизации связана с тем, что при наличии комплексной гидродинамической передачи на хороших дорогах при некоторых вариантах разбивки целесообразнее стартовать с более высоких передач.

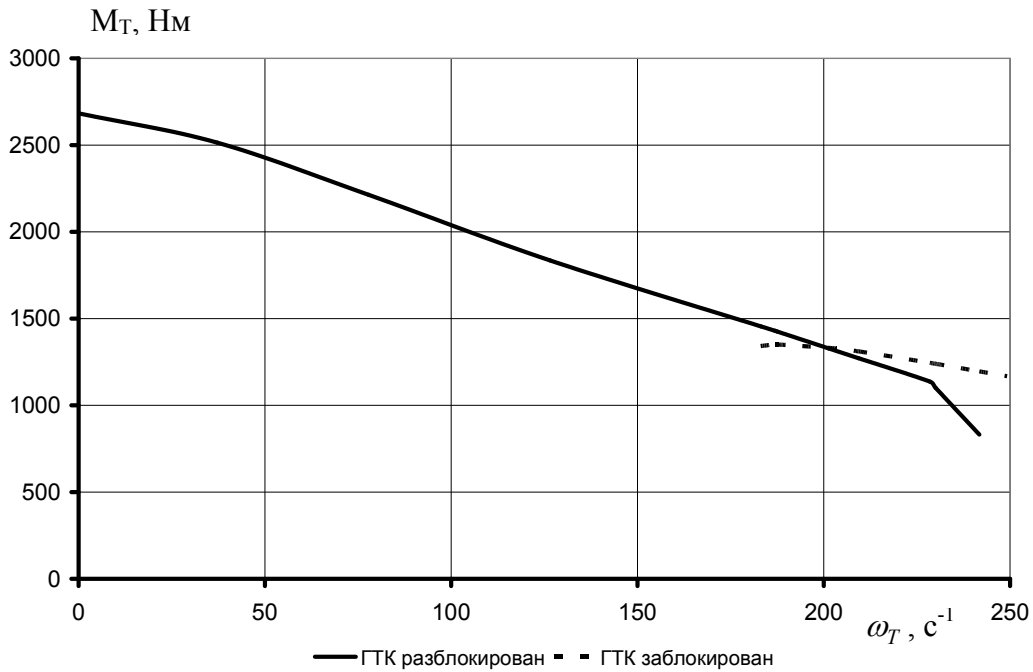


Рис. 2. Внешняя характеристика двигателя 3ТД-3 с комплексной гидродинамической передачей ГТК – XV от БМП-3

Для нахождения оптимального набора передаточных чисел ПКП, который бы позволил эксплуатировать машину в заданных условиях, с точки зрения наилучшей динамики разгона в качестве оптимизируемой функции нескольких переменных выбираем показатель комплексной оценки динамичности машины [1].

В качестве оптимального значения функции будем искать максимальное значение показателя комплексной оценки динамичности машины и соответствующие ему значения передаточных отношений трансмиссии.

Закон распределения типов дорог и соответствующих им коэффициентов сопротивления движению примем равновероятным. Сами коэффициенты сопротивления движению будем варьировать в диапазоне от 0,015 до 0,08 для «нормального» диапазона раздаточной коробки.

Алгоритм вычисления времени разгона проводился по методикам, изложенным в соответствующей литературе по теории гусеничных и колесных машин [16-18].

В результате проведенных расчетов были получены максимально возможные значения показателя комплексной оценки динамичности  $K_D$  для вариантов пяти, и шестиступенчатой ПКП БТР-4Е, работающей совместно с двигателем 3ТД-3 и ГТК – XV от БМП-3, а также соответствующие им значения передаточных отношений. Для шестиступенчатой ПКП была просчитана ПКП с последовательным редуцированием, построенная по схеме «3+3».

Результаты расчетов в виде наборов передаточных чисел, обеспечивающих максимальную динамику разгона машины при заданных условиях эксплуатации, соответствующие им показатели коэффициента комплексной оценки динамичности  $K_D$ , а также краткая оценка показателей сложности и габаритов ПКП, выполненная по методикам [19], сведены в таблицу 1.

Сравнительные характеристики ПКП

	Штатная	5-ступенчатая оптимальная	6-ступенчатая оптимальная	6-ступенчатая «3+3»
Число передач для движения вперед	5	5	6	6
Число передач для движения назад	1	1	1	3
Число степеней свободы	3	3	3	3
Число планетарных рядов	3	3	3	4
Число остановочных тормозов	2	3	4	4
Число блокировочных фрикционов	2	2	2	2
$K_D$	0,51163	0,520387	0,536678	0,515895
$i_1$	7,15	6,05	6,6	6
$i_2$	3,03	3	3	4
$i_3$	1,92	1,9	2	3
$i_4$	1,4	1,44	1,6327	2
$i_5$	1	1	1,3605	1,333
$i_6$	X	X	1	1

На рис. 3–5 представлены графические зависимости времени разгона до максимально достижимой скорости, скорости 40 и 60 км/ч БТР-4 со штатной и тремя вариантами предлагаемых разбивок передаточных отношений от коэффициента сопротивления движению. При этом на рис. 3 также приведены зависимости максимально достижимой скорости и коэффициента сцепления колес с опорной поверхностью от коэффициента сопротивления движению.

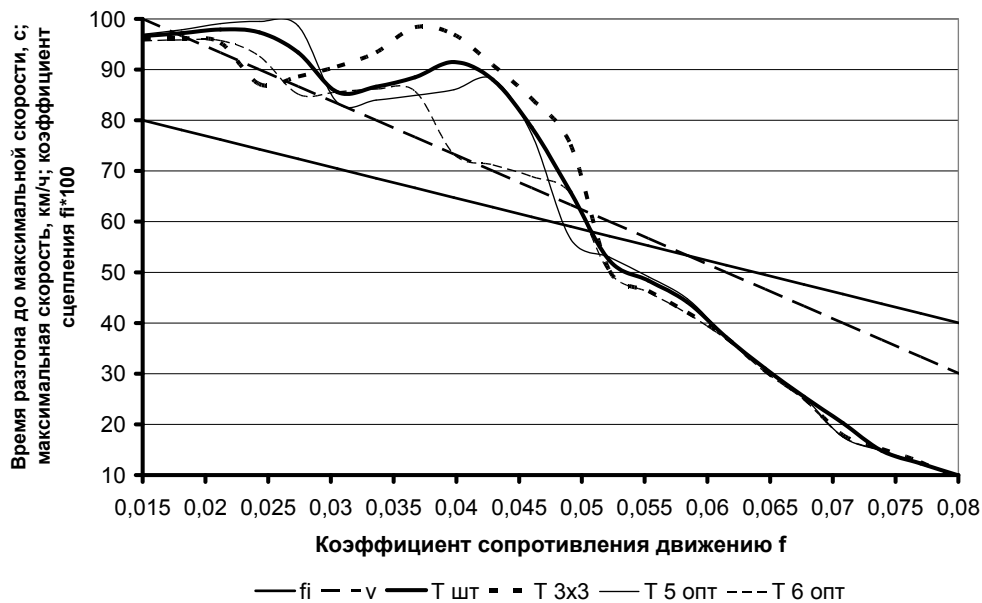


Рис. 3. Зависимости от коэффициента сопротивления движению максимально достижимой скорости, времени ее достижения и коэффициента сцепления колес с опорной поверхностью

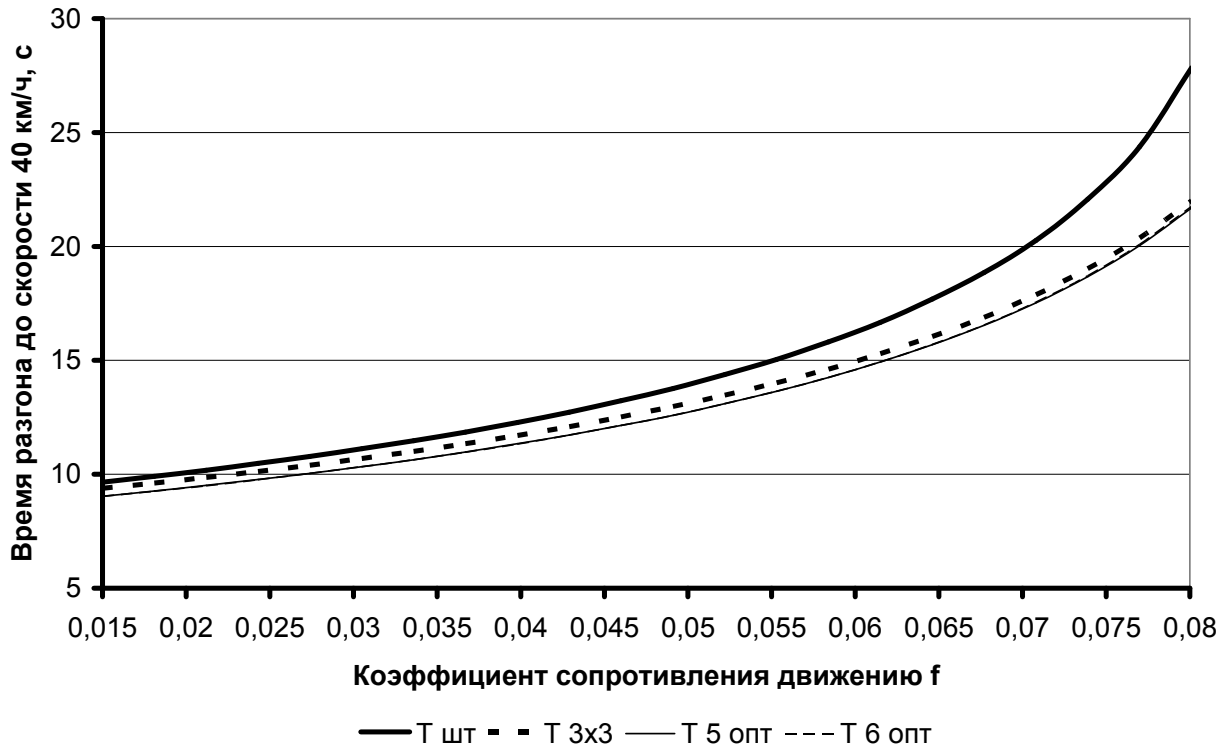


Рис. 4. Зависимости от коэффициента сопротивления движению времени достижения скорости 40 км/ч

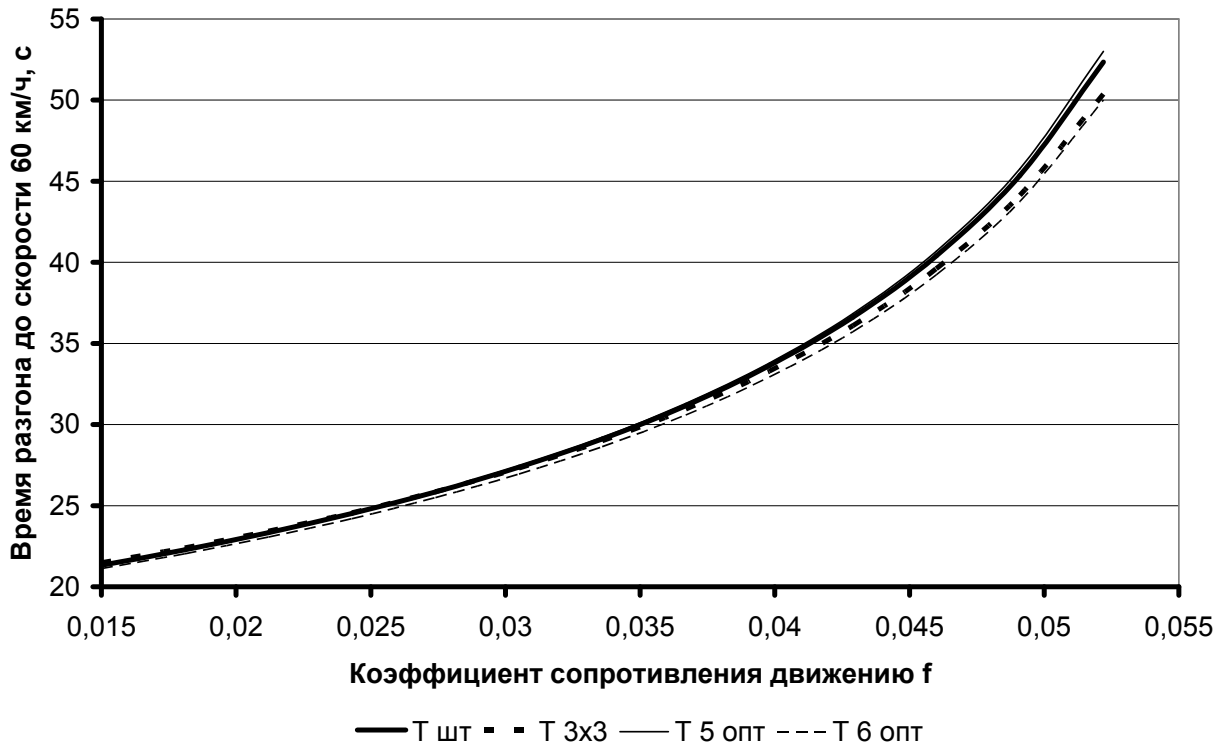


Рис. 5. Зависимости от коэффициента сопротивления движению времени достижения скорости 60 км/ч

**Выводы.**

1. Все предложенные варианты разбивки передаточных отношений механической ПКП (5-ступенчатая оптимальная, 6-ступенчатая оптимальная и 6-ступенчатая с последовательным редуцированием «3+3») по показателю комплексной оценки динамичности  $K_D$  превышают показатель штатной коробки соответственно на 1,7%, 4,9% и 0,83%.

2. Заметным можно считать выигрыш в 4,9% 6-ступенчатой оптимальной ПКП, что, в отличие от других вариантов разбивки подтверждается во всем диапазоне изменения коэффициента сопротивления движению и при разгоне как до максимально достижимой скорости, так и до 40 и 60 км/ч.

3. Шестиступенчатая ПКП с последовательным редуцированием, выполненная по принципу «3+3», при незначительном выигрыше в динамике одновременно в отличие от всех других вариантов позволяет только один раз в процессе разгона одновременно переключать сразу два управляющих элемента при переходе с III передачи на IV, реализовывать набор из трех передач для движения задним ходом с возможностью плавного последовательного переключения и разгона, а также позволяет существенно снизить угловые скорости вращения сателлитов относительно своих осей.

**Література:** 1. Волонцевич Д.О. Методика комплексної оцінки динамічності військових гусеничних та колісних машин на етапі структурно-параметричного синтезу їх трансмісій / Д.О. Волонцевич, Є.О. Веретенніков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірка наукових праць. Тематичний випуск: Транспортне машинобудування. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №8. – С. 50-56. 2. Вахламов В.К. Техника автомобильного транспорта. Подвижной состав и эксплуатационные свойства / Вахламов В.К. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 528 с. 3. Токарев А.А. Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобиля / Токарев А.А. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с. 4. Бортницкий П.И. Тягово-скоростные качества автомобилей. Справочник / Бортницкий П.И., Задорожный В.И. – К.: Вища школа, 1978. – 114 с. 5. Голованов С.А. Исследование тягово-динамических показателей автотракторных средств на внутрихозяйственных перевозках: дис... канд. техн. наук: 05.20.01 / Голованов Сергей Александрович. – Благовещенск, 2007. – 132 с. 6. Барвинок В.Г. Разработка рекомендаций по оптимизации режимов работы двигателя и трансмиссии городского автобуса: дис... канд. техн. наук: 05.05.03 / Барвинок Владимир Григорьевич. – Москва, 1984. – 177 с. 7. Новосельский А.Е. Повышение эффективности промышленного тракторного агрегата с автоматической трансмиссией путем рационального выбора ее параметров: дис... канд. техн. наук: 05.05.03 / Новосельский Андрей Евгеньевич. – Челябинск, 2009. – 220 с. 8. Курис Э.В. Основы новых методов кинематического расчета коробок передач: дис... канд. техн. наук: 05.03.01 / Курис Эдуард Валерьевич. – Ростов-на-Дону, 2009. – 203 с. 9. Резник Л.Г. Эффективность использования автомобилей в различных условиях эксплуатации / Резник Л.Г. – М.: Транспорт, 1989. – 128 с. 10. Гладов В.И. Специальные транспортные средства / Гладов Г.И., Петренко А.М. – М.: ООО «Гринлайт +», 2010. – 384 с. 11. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин / Ларин В.В. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 391 с. 12. Селифонов В.В. Теория автомобиля / Селифонов В.В. – М.: ООО «Гринлайт +», 2009. – 208 с. 13. Павлов В.В. Методы расчета многоцелевых гусеничных и колесных машин / Павлов В.В. – М.: ООО «Гринлайт +», 2007. – 127 с. 14. Русаков С.С. Разработка методики оптимизации передаточных чисел механической ступенчатой трансмиссии легкового автомобиля с учетом режимов работы его дви-

гателя: дис... канд. техн. наук: 05.05.03 / Русаков Сергей Сергеевич. – Тольятти, 2007. – 220 с.

15. Блохин А. Н. Разработка методики поиска рациональных передаточных чисел трансмиссии с учетом эксплуатационных свойств и назначения автомобиля: дис... канд. техн. наук: 05.05.03 / Блохин Андрей Николаевич. – Нижний Новгород, 2002. – 234 с.

16. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин / Забавников Н.А. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.

17. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин / Смирнов Г.А. – М.: Машиностроение, 1981. – 271 с.

18. Акишев Е.С. Новые пути совершенствования зарубежных трансмиссий / Е.С. Акишев, В.М. Антонов, В.И. Разжигаев // Вестник бронетанковой техники. – 1991. – №2. – С.65-70.

19. Филичкин Н.В. Анализ планетарных коробок передач транспортных и тяговых машин / Филичкин Н.В. – Челябинск.: ЮУрГУ, 2008. – 178 с.

**Bibliography (transliterated):**

1. Voloncevich D.O. Metodika kompleksnoi ocinki dinamichnosti vijs'kovih gusenichnih ta kolisnih mashin na etapi strukturno-parametrichnogo sintezu ih transmisij / D.O. Voloncevich, Є.О. Veretennikov // Visnik NTU «HPI». Zbirka naukovih prac'. Tematicnij vipusk: Transportne mashinobuduvannja. – Harkiv: NTU «HPI». – 2011. – №8. – S. 50-56.

2. Vahlamov V.K. Tehnika avtomobil'nogo transporta. Podvizhnoj sostav i jekspluatacionnye svojstva / Vahlamov V.K. – М.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2004. – 528 s.

3. Tokarev A.A. Toplivnaja jekonomichnost' i tjagovo-skorostnye kachestva avtomobilja / Tokarev A.A. – М.: Ma-shinostroenie, 1982. – 224 s.

4. Bortnickij P.I. Tjagovo-skorostnye kachestva avtomobilej. Spravochnik / Bortnickij P.I., Zadorozhnyj V.I. – К.: Vishha shkola, 1978. – 114 s.

5. Golova-nov S.A. Issledovanie tjagovodnamicheskikh pokazatelej avtotraktornyh sredstv na vnutri-hozjajstvennyh perevozkah: dis... kand. tehn. nauk: 05.20.01 / Golovanov Sergej Aleksandrovich. – Blagoveshhensk, 2007. – 132 s.

6. Barvinok V.G. Razrabotka rekomendacij po optimizacii re-zhimov raboty dvigatelja i transmissii gorodskogo avtobusa: dis... kand. tehn. nauk: 05.05.03 / Barvinok Vladimir Grigor'evich. – Moskva, 1984. – 177 s.

7. Novosel'skij A.E. Povyshenie jeffektivnosti promyshlennogo traktorного agregata s avtomaticheskoy transmissiej putem racional'nogo vybora ee parametrov: dis... kand. tehn. nauk: 05.05.03 / Novosel'skij Andrej Evgen'evich. – Cheljabinsk, 2009. – 220 s.

8. Kuris Je.V. Osnovy novyh metodov kinematicheskogo rascheta korobok peredach: dis... kand. tehn. nauk: 05.03.01 / Kuris Jedu-ard Valer'evich. – Rostov-na-Donu, 2009. – 203 s.

9. Reznik L.G. Jeffektivnost' ispol'zovanija avtomobilej v razlichnyh uslovijah jekspluatacii / Reznik L.G. – М.: Transport, 1989. – 128 s.

10. Gladov V.I. Special'nye transportnye sredstva / Gladov G.I., Petrenko A.M. – М.:ООО «Grinlajt +», 2010. – 384 s.

11. Larin V.V. Teorija dvizhenija polnoprivodnyh kolesnyh mashin / Larin V.V. – М.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Bauman, 2010. – 391 s.

12. Selifonov V.V. Teorija avtomobilja / Selifonov V.V. – М.: ООО «Grinlajt +», 2009. – 208 s.

13. Pavlov V.V. Metody rascheta mnogocelovyh gusenichnyh i kolesnyh mashin / Pavlov V.V. – М.:ООО «Grinlajt +», 2007. – 127 s.

14. Rusa-kov S.S. Razrabotka metodiki optimizacii peredatochnyh chisel mehanicheskoy stupenchatoj transmissii legkovogo avtomobilja s uchetom rezhimov raboty ego dvigatelja: dis... kand. tehn. nauk: 05.05.03 / Rusakov Sergej Sergeevich. – Tol'jatti, 2007. – 220 s.

15. Blohin A. N. Razra-botka metodiki poiska racional'nyh pere-datochnyh chisel transmissii s uchetom jekspluataci-onnyh svojstv i naznachenija avtomobilja: dis... kand. tehn. nauk: 05.05.03 / Blohin Andrej Ni-kolaevich. – Nizhnij Novgorod, 2002. – 234 s.

16. Za-bavnikov N.A. Osnovy teorii transportnyh gusenichnyh mashin / Zabavnikov N.A. – М.: Mashinostroenie, 1975. – 448 s.

17. Smirnov G.A. Teorija dvizhenija kolesnyh mashin / Smirnov G.A. – М.: Mashinostroenie, 1981. – 271 s.

18. Akishev E.S. Novye puti sovershenstvovanija zarubezhnyh trans-missij / E.S. Akishev, V.M. Antonov, V.I. Razzhigaev // Vestnik bronetankovoj tehniki. – 1991. – №2. – S.65-70.

19. Filichkin N.V. Analiz planetarnyh korobok peredach transportnyh i tjagovyh mashin / Fi-lichkin N.V. – Cheljabinsk.: JuUrGU, 2008. – 178 s.

Волонцевич Д.О., Веретенников Є.О., Костяник І.В., Пасічний С.С., Воронцов С.М., Пильова Т.К.

ДО ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕДАТОЧНИХ ЧИСЕЛ ПЛАНЕТАРНОЇ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ БРОНЕТРАНСПОРТЕРА БТР-4

В даній роботі проведено застосування раніше розробленої методики для визначення передаточних відношень, самих раціональних з точки зору найкращої динаміки розгону, вітчизняного колісного бронетранспортера БТР-4 з штатним двигуном і комплексною гідродинамічною передачею в різних, найбільш вірогідних умовах експлуатації.

При проведенні математичного моделювання і оптимізаційних розрахунків були враховані не тільки основні критерії, а й основні конструктивні обмеження, які суттєво впливають на кінцевий результат.

Одержані матеріали є основою для подальшої роботи безпосередньо над проблемою синтезу нової кінематичної схеми механічної частини планетарної ступеневої коробки передач для бронетранспортеру БТР-4.

Волонцевич Д.О., Веретенников Е.А., Костяник И.В., Пасечный С.С., Воронцов С.Н., Пылева Т.К.

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ ПЛАНЕТАРНОЙ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ БРОНЕТРАНСПОРТЕРА БТР-4

В работе приведена ранее разработанная методика определения передаточных отношений, самых рациональных с точки зрения наилучшей динамики разгона, отечественного колесного бронетранспортера БТР-4 со штатным двигателем и комплексной гидродинамической передачей в разных, наиболее выгодных условиях эксплуатации.

При проведении математического моделирования и оптимизационных расчетов были учтены не только основные критерии, но и основные конструктивные ограничения, существенно влияющие на конечный результат.

Полученные материалы являются основой для дальнейшей работы непосредственно над проблемой синтеза новой кинематической схемы механической части планетарной ступенчатой коробки передач для бронетранспортера БТР-4.

Volontsevich D.O., Veretennikov E.A., Kostyanik I.V., Pasechnyj S.S., Vorontsov S.N., Pylyova T.K.

TO QUESTION OF GEAR-RATIOS OPTIMIZATION OF PLANETARY GEAR-BOX FOR THE ARMORED TROOP-CARRIER BTR-4

In hired application of the before worked out methodology of determination of transmission relations most rational from the point of view of the best dynamics of acceleration of the ukrainian wheeled armored troop-carrier BTR-4 with a regular engine and complex hydrodynamic transmission in the different most credible external environments is conducted.

During realization of mathematical design and optimization calculations not only basic criteria but also basic structural limitations that substantially influence on end-point were taken into account.

The got results are basis for further work on the synthesis of new kinematics chart of mechanical part of planetary step gear-box for the armored troop-carrier BTR-4.