

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЯГОВО-СКОРОСТНЫХ И ТОПЛИВО-ЭКОНОМИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЕННЫХ МАШИН

Введение. Переориентация военной стратегии на решение локальных конфликтов и выполнение антитеррористических операций меняет характер комплектации современной армии личным составом и боевой техникой. Особое значение приобретают профессиональные, хорошо обученные, малые по составу воинские подразделения, оснащенные экономичной и высокомобильной бронированной техникой, которая способна обеспечить длительную автономную боевую работу экипажа в отрыве от тылов и баз снабжения. Исходя из этого, современные военные машины (ВМ) должны обладать следующими качествами – это высокий интеллектуальный уровень, способность оперативно реагировать на быстро изменяющуюся обстановку, иметь хорошую обзорность и связь, оставаясь при этом незаметным для противника, быть высокомобильными, надежно защищенными, обладать большим запасом хода и иметь возможность дать огневой отпор. Таким образом, исследования ученых и разработки конструкторов в направлениях повышения тягово-скоростных и топливно-экономичных характеристик ВМ продолжают быть актуальными.

Анализ последних достижений и публикаций. На сегодняшний день в качестве энергетической установки на большинстве колесных и гусеничных ВМ применяется дизельный двигатель (ДД), как наиболее удовлетворяющий по совокупности следующих требований: допустимые габаритные размеры и вес для установки на ВМ, наибольшая габаритная и удельная мощности, хорошая тяговая характеристика и приемистость при трогании машины с места, небольшая продолжительность пуска при температурах выше +5 °С и допустимая при температурах ниже +5 °С, безотказная работа в различных климатических условиях, возможность работы на разных видах топлива (керосин, бензин, дизельное топливо); имеет наименьшую пожароопасность в случае использования дизельного топлива и наибольший КПД в сравнении с другими видами энергетических установок [1]. Однако, основным недостатком ДД, как и других видов двигателей внутреннего сгорания, является значительное изменение мощности с изменением частоты вращения коленчатого вала. Из-за этого крутящий момент данного типа энергетической установки изменяется в небольших пределах, что не соответствует широкому спектру изменения внешних условий движения. Поэтому для успешного использования ДД в качестве энергетической установки на колесных и гусеничных транспортных машинах (ТМ) применяется трансмиссия.

В результате получаем, что для повышения тягово-скоростных и топливно-экономичных характеристик ВМ необходимо совершенствовать конструкцию как ДД, так и трансмиссии. Поэтому за последние десятилетия, с одной стороны, на ДД были внедрены и отработаны до совершенства системы наддува и подогрева воздуха, системы охлаждения двигателя, микропроцессорные системы автоматического управления (МСАУ) впрыском топлива, фаз газораспределения, отключения цилиндров на холостом ходу [2]. Все это позволило значительно увеличить габаритную и удельную мощности ДД, и достичь только до 40 % коэффициента полезного действия (КПД). Больше половины энергии, которая запасена в природном топливе, к сожалению, рассеивается в виде тепла. В холодное время года часть этого тепла используется для обогрева обитаемого отделения ТМ, а в теплое время года бесцельно рассеивается. С другой стороны, на ТМ были внедрены разные виды трансмиссий, МСАУ работой этих трансмиссий, а также комплексные системы

управления движением машин, которые согласованно управляют работой двигателя и трансмиссии [3, 4]. Все эти мероприятия позволили до определенного уровня улучшить тягово-скоростные и топливо-экономичные показатели ТМ, значительно облегчить управление ими, снизить утомляемость водителя, сократить время на обучение вождению за счет уменьшения и упрощения операций управления со стороны водителя, увеличить ресурс работы двигателя и трансмиссии. Однако, если рассмотреть настоящий уровень развития технологий по созданию силовых установок для ТМ то можно увидеть, что имеются резервы для дальнейшего совершенствования конструкций ДД и трансмиссий, которые позволят еще больше увеличить тактико-технические характеристики ВМ, а также улучшить технические характеристики ТМ гражданского назначения. Поэтому необходимо проведение дальнейших исследований в этой области.

Цель и постановка задачи. Данная работа ставит своей целью поиск новых технических решений, которые позволят повысить тягово-скоростные и топливо-экономичные характеристики ВМ в сравнении с уже достигнутыми. Для этого необходимо выполнить анализ характеристик ДД и трансмиссий, которые уже устанавливаются на ТМ, анализ их конструкций, а также анализ современного уровня технологий, которые в настоящее время применяются в машиностроении при создании силовых установок для ТМ.

Анализ характеристик дизельного двигателя, трансмиссий ТМ и их конструкций.

Понятно, что тип энергетической установки ТМ влияет на ее конструкцию, но наиболее важным в этом случае являются не сами конструктивные особенности энергетической установки, а ее внешняя скоростная характеристика. Качественно общий вид этой характеристики выглядит одинаково для разных моделей ДД при различных абсолютных значениях параметров. Аналитически строят внешнюю скоростную характеристику ДД по следующим зависимостям [5]:

$$N_e = N_{e\max} \cdot \left[a_\omega \frac{\omega}{\omega_N} + b_\omega \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^2 - c_\omega \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^3 \right]; \quad N_{ce} = N_e - \Delta N; \quad \Delta N = a_\Delta \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^{a_N} N_{e\max}; \quad (1)$$

$$M_e = \frac{N_e}{\omega}; \quad M_{ce} = \frac{N_{ce}}{\omega}; \quad g_e = g_{eN} \cdot \left[a_g - b_g \frac{\omega}{\omega_N} + c_g \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

где N_e , N_{ce} и ΔN – эффективная, свободная мощности и мощность потерь, кВт; M_e , M_{ce} – эффективный и свободный крутящие моменты коленвала двигателя, Н·м; g_e – удельный эффективный расход топлива г/(кВт·ч); ω – частота вращения коленвала двигателя, с⁻¹; a_ω , b_ω , c_ω , a_g , b_g , c_g – коэффициенты.

Например, рассмотрим внешнюю скоростную характеристику ДД 3ТД-3 на рис. 1. На характеристике нанесены следующие характерные точки: ω_{\min} – минимальная частота вращения коленвала двигателя; ω_{\max} – максимальная частота вращения коленвала двигателя; ω_{xx} – максимальная частота вращения коленвала двигателя на холостом ходу; ω_{Memax} – частота вращения, соответствующая максимальной величине эффективного крутящего момента двигателя; $\omega_{Mсвmax}$ – частота вращения, соответствующая максимальной величине свободного крутящего момента двигателя; ω_{gemin} – частота вращения, соответствующая минимальной величине удельного эффективного расхода топлива; M_{emax} – максимальный эффективный крутящий момент; $M_{свmax}$ – максимальный свободный крутящий момент; g_{emin} – минимальный удельный эффективный расход топлива; N_{emax} – максимальная эффективная мощность; $N_{свmax}$ – максимальная свободная мощность.

Из анализа внешней скоростной характеристики видно, что при максимальной подаче топлива рабочий диапазон ДД ограничивается точками $\omega_{Mсвmax}$ и ω_{max} , в котором обеспе-

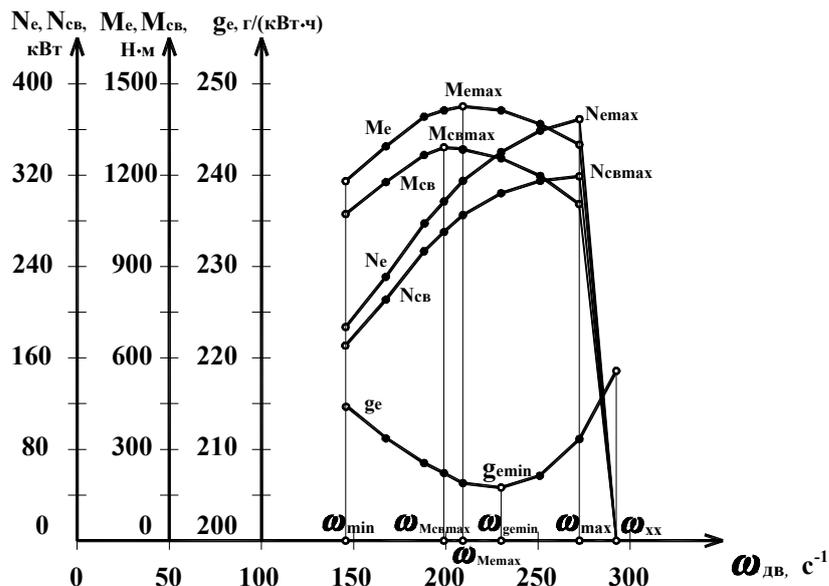


Рис.1. Внешняя скоростная характеристика дизельного двигателя 3ТД-3

чивается устойчивая работа. В диапазоне частот между точками ω_{\min} и $\omega_{M_{свmax}}$ двигатель будет работать неустойчиво, а частота вращения коленчатого вала будет уменьшаться до полной остановки, так как в этом случае момент сопротивления превышает крутящий момент, который развивает двигатель. Наиболее оптимальной для работы ДД является область между точками $\omega_{M_{свmax}}$ и $\omega_{g_{emin}}$. В этой области можно получить максимальный свободный крутящий момент $M_{свmax}$ и минимальный удельный эффективный расход топлива g_{emin} . Но, к сожалению, эта область имеет небольшой кинематический диапазон до 31 c^{-1} . Поэтому, долгое время, конструкторы не могли создать трансмиссию для ТМ весом более 5 т, которая бы обеспечивала работу ДД в области минимального удельного эффективного расхода топлива и максимального свободного крутящего момента, а также позволила изменять скорость машины от 0 до 33,3 м/с (120 км/ч), имела небольшие габаритные размеры, вес, высокий КПД и надежную работу в различных дорожных условиях. В результате появились несколько разных видов конструкций трансмиссий для ТМ, которые имеют определенные недостатки по отношению к изложенным требованиям. Рассмотрим их.

По характеру изменения передаточного отношения современные трансмиссии классифицируются на ступенчатые, бесступенчатые и комбинированные. В свою очередь к ступенчатым трансмиссиям относятся трансмиссии с вальными и планетарными механическими ступенчатыми коробками передач (МСКП). К бесступенчатым – трансмиссии с гидробъемными, электрическими и вариаторными передачами. К комбинированным – трансмиссии с гидромеханическими и электромеханическими передачами (ГМП и ЭМП). Выполним их сравнительный анализ.

Ступенчатые механические трансмиссии (СМТ) большое распространение на ТМ получили благодаря их высокому значению КПД, в пределах 86 – 92% [6] в зависимости от включенной передачи, а также благодаря компактности, небольшим размерам и весу МСКП, их надежной работе в различных условиях эксплуатации ТМ, относительной простоте в изготовлении. Однако, они имеют следующие существенные недостатки – это ступенчатое изменение передаточных чисел и отсутствие возможности поддерживать работу ДД в диапазоне между точками $\omega_{M_{свmax}}$ и $\omega_{g_{emin}}$. Это видно из тяговой и разгонной характеристик ТМ с СМТ, которые строят по следующим зависимостям [5]:

$$P_{\text{тяги}} = \frac{M_{\text{св}}}{R_{\text{вк}}} i_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}}; \quad v_{\text{м}} = \frac{\omega \cdot R_{\text{вк}}}{i_{\text{тр}}} \quad (3)$$

где $P_{\text{тяги}}$ – сила тяги на ведущих колесах машины, кН; $M_{\text{св}}$ – свободный крутящий момент коленвала двигателя, Н·м; $R_{\text{вк}}$ – радиус ведущего колеса, м; $i_{\text{тр}}$ – передаточное отношение трансмиссии; $\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии, $v_{\text{м}}$ – скорость движения машины м/с; ω – частота вращения коленвала двигателя, с⁻¹.

Например, рассмотрим на рис. 2 характеристики БТР-3У с СМТ.

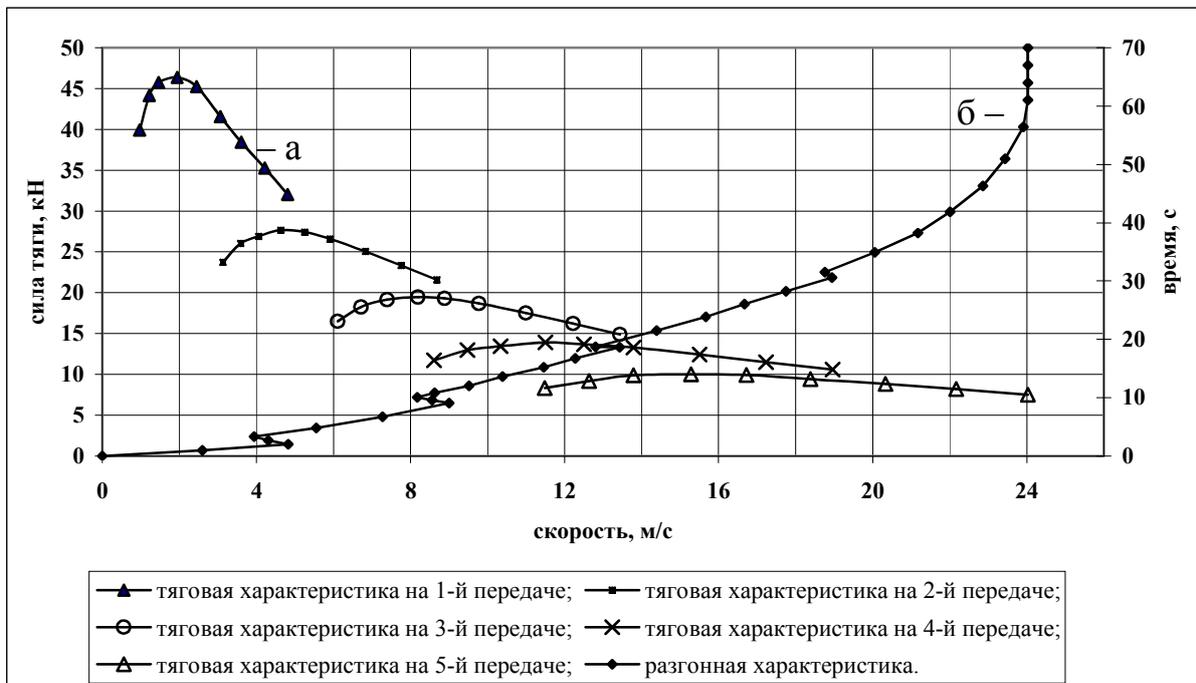


Рис.2. Характеристики БТР-3У с СМТ:
 а – тяговая характеристика; б – разгонная характеристика.

В СМТ используется рабочий диапазон ДД ограниченный точками $\omega_{\text{Мсвmax}}$ и ω_{max} . Ступенчатое изменение передаточных чисел ведет к разрыву потока мощности при переходе с передачи на передачу, что приводит к уменьшению эффективности использования мощности двигателя, снижению средней скорости движения, а также увеличению времени разгона машины.

Кроме того, при переключении передач происходит скачкообразное изменение силы тяги на ведущих колесах с разрывом потока передаваемой мощности, которое вызывает ударные нагрузки в трансмиссии и на коленчатый вал двигателя, а это в свою очередь приводит к снижению ресурса работы, как трансмиссии, так и двигателя. Для поддержания рабочего диапазона ДД в пределах $\omega_{\text{Мсвmax}}$ и $\omega_{\text{ге}}$ и уменьшения скачков силы тяги на ведущих колесах при переключении передач необходимо в МСКП увеличивать число передач. Это, в свою очередь, ведет к большим габаритным размерам, большому весу и усложнению конструкции МСКП. Такие коробки, к сожалению, невозможно разместить в ограниченном пространстве ТМ. Поэтому конструктора искали новые технические решения для создания бесступенчатых передач, которые позволили бы поддерживать постоянный режим работы двигателя, плавно изменять передаточное отношение в трансмиссии и исключить разрыв потока мощности, передаваемой от двигателя к ведущим колесам.

В результате появилось три направления в создании бесступенчатых передач – механические вариаторы скорости (МВС), гидравлические передачи (ГП) и электрические передачи (ЭП).

В настоящее время существует два основных вида конструкций МВС, которые уже применяются на легких колесных машинах – фрикционные и клиноременные вариаторы. Благодаря высокому КПД до 96%, большому диапазону непрерывного регулирования МВС привлекают внимание разработчиков трансмиссий. Однако их работоспособность при передаче больших мощностей более 150 кВт от двигателя к колесам ТМ не высока. Поэтому МВС пока что применяют только на легкой технике – мопеды, мотороллеры, снегоходы, а также легковые автомобили весом до 2,5 т [6]. Тем не менее, работы по совершенствованию конструкций МВС продолжаются, так как в них энергия вращения коленчатого вала двигателя не преобразуется ни в какой другой вид энергии, а лишь изменяется вращение по частоте и моменту вплоть до колес ТМ, что позволяет обеспечивать высокий КПД данного типа передачи [7,8].

Передавать большие мощности от двигателя к колесам ТМ способны ГП и ЭП. Но они имеют низкие значения КПД, в пределах 57 – 83% в зависимости от режима работы [6, 9]. Это происходит из-за того, что в них энергия вращения коленчатого вала двигателя сначала преобразуется в давление жидкости, или скоростной поток жидкости, или электрический ток и магнитное поле, а потом в энергию вращения ведущего колеса. Т.е. в передаче энергии от вала двигателя к ведущим колесам участвуют промежуточные носители – жидкость, электрическое и магнитное поля. Тем не менее, ГП и ЭП до сегодняшнего дня являются незаменимыми при проектировании трансмиссий для огромных машин весом больше 100 тон – карьерные экскаваторы, самосвалы, ракетовозы и т.п. В этих случаях не рассматривается экономичность проектируемой трансмиссии, а проблема стоит в отсутствии возможности механически передать мощный управляемый крутящий момент на колеса огромной машины. Кроме того, ГП и ЭП дают преимущество в выполнении компоновки полноприводных ТМ, так как отсутствуют жесткие механические связи между элементами трансмиссии, что позволяет реализовать различные варианты расположения энергетической установки, для колесных машин выполнить разное количество приводных осей и разные варианты колесной формулы, а также расширить внутреннее пространство в ТМ.

ГП делят на два основных вида – гидрообъемные (гидростатические) и гидродинамические. Но и те и другие имеют большие габаритные размеры и массу в случае передачи мощностей от 200 кВт и выше. Это позволяет применять их только на ВМ весом более 50 т. Также с ростом передаваемого потока мощности нелинейно и в значительной степени возрастают потери в ГП. Поэтому гидрообъемные и гидродинамические передачи стали объединять с планетарными МСКП. В результате были получены комбинированные полнопоточные и двухпоточные ГМП, которые являются более компактными в сравнении с ГП и у них КПД может достигать 92 % на стационарных режимах движения, а плавное изменение передаточного отношения обеспечивает система управления.

Например, возможность блокировать комплексный гидротрансформатор (ГТ) в полнопоточной ГМП, при движении с постоянной скоростью, позволяет увеличивать величину ее КПД до значения, соответствующего МСКП. В тоже время разблокированный ГТ в моменты переключения передач в планетарной МСКП, а также при начале движения ТМ, обеспечивает плавное изменение передаточного отношения в трансмиссии. Таким образом, исключается разрыв потока мощности, передаваемой от двигателя к ведущим колесам. Это видно из тяговой и скоростной характеристик ТМ с гидромеханической трансмиссией (ГМТ) рис. 3, которая построена на основе полнопоточной ГМП. Характеристики строят по зависимостям (3). Только в место величин свободного крутящего момента коленвала двигателя $M_{св}$ подставляют величины крутящего момента на турбинном колесе ГТ M_m , а в место величин частоты вращения коленвала двигателя ω подставляют вели-

чины частоты вращения турбинного колеса ГТ ω_m . Эти величины определяют из следующих зависимостей [5]:

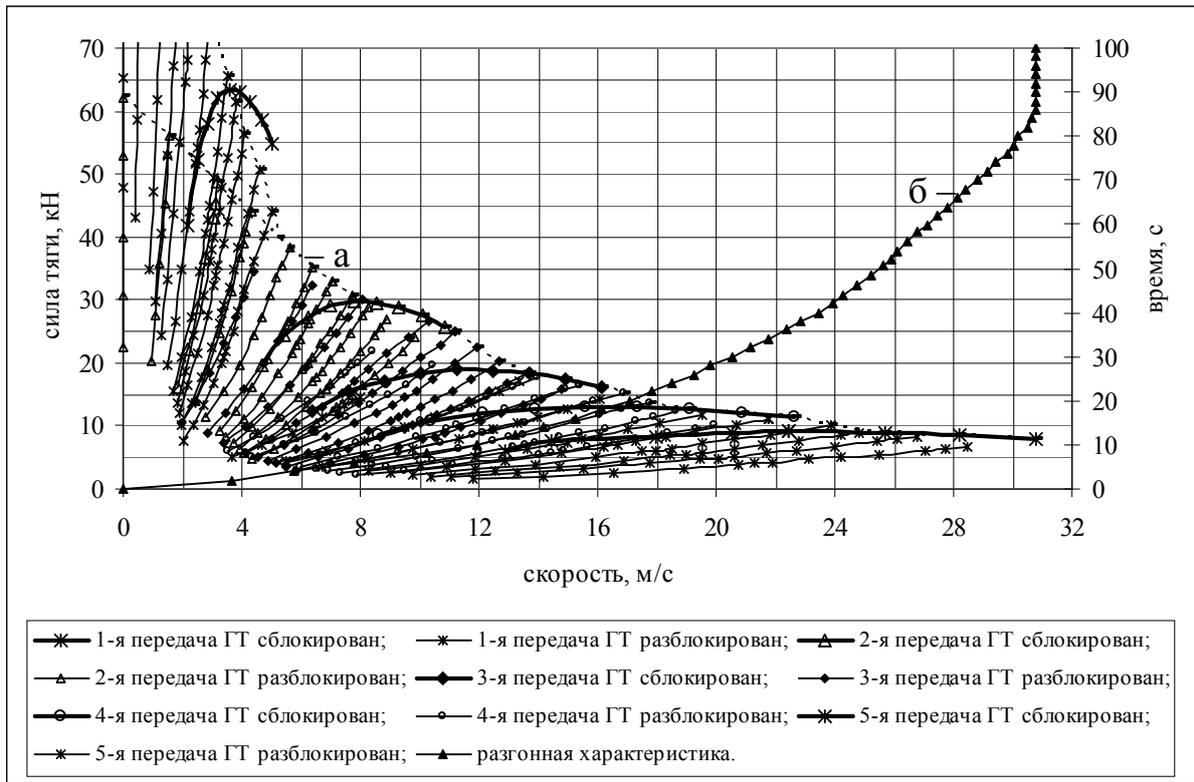


Рис.3. Характеристики БТР-4Е с полнопоточной ГМТ:
 а – тяговая характеристика; б – разгонная характеристика.

$$M_m = \kappa_{эм} \cdot M_n = \kappa_{эм} \cdot \lambda_n \cdot \gamma_{жс} \cdot \omega_n^2 \cdot D_a^5; \quad \omega_m = \omega_n \cdot i_{эм}^{-1}. \quad (4)$$

где M_m – крутящий момент, развиваемый турбинным колесом ГТ, Н·м; $\kappa_{эм}$ – коэффициент трансформации момента ГТ; M_n – крутящий момент, развиваемый насосным колесом ГТ, Н·м; λ_n – коэффициент момента насосного колеса, c^2/m ; $\gamma_{жс}$ – удельный вес рабочей жидкости, H/m^3 ; ω_n – угловая скорость вала насосного колеса ГТ, c^{-1} ; D_a – активный диаметр гидропередачи, м; $i_{эм}^{-1}$ – кинематическое передаточное число ГТ; ω_m – угловая скорость турбинного колеса ГТ, c^{-1} .

Совершенствование конструкций электрических трансмиссий (ЭТ) до определенного времени происходило в тех же направлениях, что и в гидравлических. Т.е. для уменьшения габаритных размеров, массы и повышения КПД трансмиссии в целом ЭП объединялись с планетарными МСКП [9]. Долгое время в качестве тяговых электродвигателей (ТЭД) использовались электродвигатели постоянного тока с последовательным и смешанным возбуждением, поскольку их скоростная характеристика по внешнему виду близка к характеристике идеального двигателя с постоянной мощностью, который в большей степени подходит для разнообразных условий эксплуатации ТМ. Регулирование скорости вращения валов ТЭД постоянного тока, а также их крутящих моментов выполнялось довольно просто. Изменялась величина добавочного переменного сопротивления в обмотках возбуждения. Однако, ни новые конструкции ТЭД постоянного тока, ни развитие технологии их изготовления не позволило существенно уменьшить их габаритные размеры и вес. Кроме того, этот тип ТЭД требовал периодического технического обслуживания в процессе эксплуатации ТМ, которое заключалось в замене контактных щеток, да и управление током в обмотке возбуждения с помощью добавочного переменного сопротивления

является не экономичным и имеет большие потери в виде выделения тепла на добавочном сопротивлении. А вот совершенствование конструкций синхронных и асинхронных ТЭД переменного тока за последние 30 лет позволило значительно уменьшить их габаритные размеры и вес, увеличить величину КПД до 95%, а также получить скоростную характеристику близкую к ТЭД постоянного тока. Кроме того, ТЭД переменного тока не требуют технического обслуживания в процессе эксплуатации ТМ.

Например, до настоящего времени асинхронный ТЭД мощностью 40 кВт имел вес порядка 270 кг и размеры 486 / 535 мм (диаметр / длина) [10]. А сейчас швейцарская фирма BRUSA предлагает синхронный и асинхронный ТЭД HSM 6.17.12 и ASM 8.24.10 мощностью 40 и 46 кВт которые имеют вес 53 и 68 кг и размеры 245 / 284 мм и 240 / 350 мм (диаметр / длина) [11]. Характеристики ТЭД ASM 8.24.10 представлены на рис. 4.

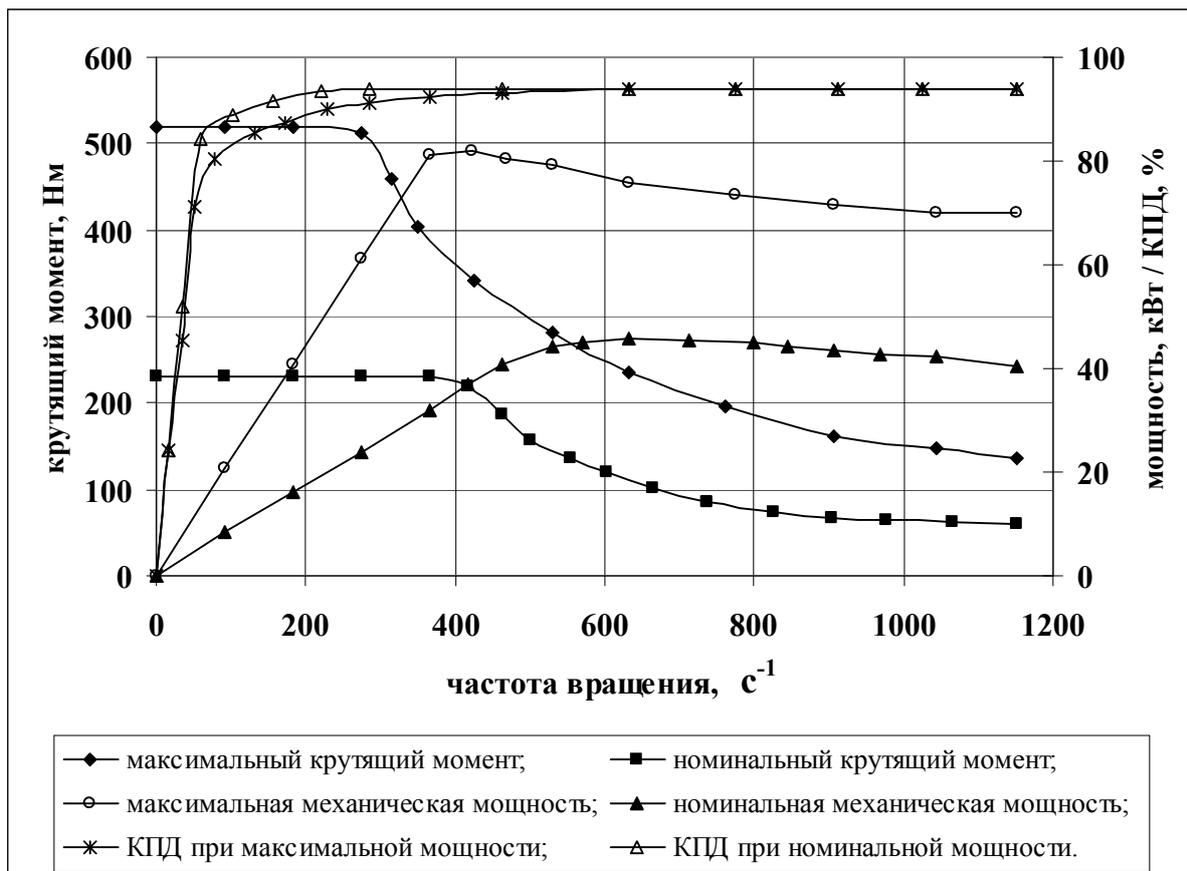


Рис.4. Характеристики ТЭД ASM 8.24.10

Такие габаритные размеры и вес ASM 8.24.10 позволяют его размещать непосредственно в колесах ВМ. Однако он имеет недостаточную величину максимального крутящего момента для применения на колесных ВМ весом до 20 т – 520 Н·м, а частота вращения достигает 1150 с⁻¹ (11000 мин⁻¹). Поэтому ASM 8.24.10 устанавливают совместно с согласующим редуктором. В результате была получена конструкция, которая называется мотор-колесо. На выходе мотор-колеса крутящий момент может достигать величины в 6 кН·м. Для 8-ми колесного БТР с мотор-колесами общая максимальная сила тяги может составлять 106 кН в случае применения колес радиусом 0,45 м.

Использование мотор-колес с индивидуальным управлением на ТМ позволило получить более высокую тяговую характеристику в сравнении с ГМТ. Это делает возможным применять полнопоточные ЭТ на ВМ весом от 5 до 35 т. Также, следует отметить,

что современный уровень силовой и микропроцессорной электроники позволяет реализовать частотное регулирование скорости вращения валов ТЭД переменного тока и их крутящих моментов, а это в свою очередь уменьшает потери мощности в ЭТ на любых режимах работы [12]. Все это делает полнопоточную ЭТ перспективной для ВМ. Однако наряду с преимуществами современная полнопоточная ЭТ имеет следующие недостатки – высокая стоимость электрических агрегатов трансмиссии в целом в сравнении с ГМТ, более низкий КПД до 83% на стационарных режимах движения и необходимость обеспечения безопасности экипажа от поражения электрическим током при высоковольтном напряжении 400..600В, которое находится на борту ТМ. По этой причине в настоящее время на ВМ широко применяются полнопоточные ГМТ, а для улучшения тяговых характеристик ВМ эти трансмиссии стали дополнять 2-х поточными гидрообъемными механизмами поворота, как на гусеничных, так и на колесных ВМ [13].

Следует отметить основной недостаток всех выше перечисленных трансмиссий для ТМ. В них оптимизирована работа по передаче энергии от ДД к ведущим колесам только при разгоне, маневрировании и установившемся прямолинейном движении ТМ. И не используется кинетическая энергия ТМ, которая теряется при торможении. Хотя, еще в конце 80-х годов сотрудником МАМИ Хортовым В.П. было доказано, что для равномерного движения автомобиля массой в 1 т на прямой дороге со скоростью 60 км/ч требуется всего 15-20 кВт энергии. А для разгона за 6-10 с до 60 км/ч требуется уже 60-80 кВт. Т.е. в четыре раза больше. А поскольку фактически после каждого разгона и равномерного движения автомобиля водитель осуществляет его частичное или полное торможение, то теряется от 15 до 60% энергии, которая была затрачена на разгон. Если эту энергию аккумулировать, а потом использовать в режимах движения с перегрузкой, то можно сэкономить до 30% топлива [14]. Но, к сожалению, на тот период времени не было подходящих накопителей энергии (НЭ), которые имели бы небольшие габаритные размеры, вес и большую энергоемкость.

Эффективно применять НЭ на ТМ стали только в конце 90-х годов. Именно в это время появились химические никель-кадмиевые и никель-металлгидридные высоковольтные аккумуляторные батареи с плотностью заряда до 100 Вт·ч/кг, которые позволили сделать компактные накопители электрической энергии (НЭЭ) для ТМ с ЭТ [15]. Емкости и удельной мощности этих НЭ уже было достаточно для накопления всей электрической энергии, которая выделяется во время торможения ТМ с ЭТ. Впоследствии появились литий-ионные и литий-полимерные высоковольтные аккумуляторные батареи с большей плотностью заряда до 150 Втч/кг [15]. Все это позволило полнопоточным ЭТ получить величину КПД превосходящую значения КПД даже у СМТ.

Тем не менее, хоть химические НЭЭ и имеют довольно высокую удельную энергоёмкость, но за несколько секунд торможения ТМ накопитель воспримет только небольшую часть заряда, к тому же с низким КПД. Поэтому дальнейшее совершенствование технологий привело к появлению электростатических НЭЭ большой емкости – ионисторы (супер-конденсаторы). Они позволяют накапливать и отдавать большое количество электрической энергии в течении 4..12 с [15]. Это еще больше позволило повысить эффективность рекуперации энергии торможения в ТМ с полнопоточными ЭТ.

Кроме совершенствования НЭЭ для ТМ также ведутся работы по созданию накопителей непосредственно кинетической энергии автомобиля и энергии сжатия газа или жидкости. Это связано с тем, что механические или гидрогазовые НЭ наиболее подходят для применения на ТМ с механическими трансмиссиями или ГМТ. Но, к сожалению, пока что эти виды НЭ большого распространения на ТМ не получили из-за их конструктивных недостатков.

Дальнейшее совершенствование конструкций разных видов НЭ для ТМ продолжается, но уже есть положительные результаты от их внедрения. Например, серийно выпускаемый компанией Toyota с 1997 года легковой автомобиль Toyota Prius [16] с бензиновым двигателем мощностью 56 кВт, электромеханической трансмиссией и никель-металлгидридной высоковольтной аккумуляторной батареей емкостью 2,1 кВт·ч способен преодолеть 100 км пути в городском цикле движения на 5,1 л топлива, а по трассе на 3,8 л. Для сравнения, такого же класса легковые автомобили с отработанными СМТ или ГМТ преодолевают 100 км в городском цикле движения на 7,3..8,5 л, а по трассе затрачивают 6,5..7 л.

В 1999 году компания United Defense модернизировала бронетранспортер M113 на гусеничном ходу путем замены автоматизированной ГМТ GMC Allison X-200-4 на полнопоточную ЭТ, а также установила химические НЭЭ. Машина была названа MTVL [17]. По отзывам представителей компании, такая конструкция силовой установки позволила улучшить разгон машины, получить более высокую среднюю скорость движения, как на дорогах, так и вне дорог, уменьшить расход топлива, увеличить запас хода, выполнять бесшумное движение на НЭЭ в течение ограниченного периода времени, а также увеличить внутреннее пространство машины и уменьшить затраты на материально-техническое обеспечение.

В 2004 году компания General Dynamics Land Systems создала разведывательный 4-х колесный автомобиль Shadow RST-V [17], на котором установлены ДД мощностью 114 кВт, полнопоточная ЭТ по принципу мотор-колес с ТЭД переменного тока мощностью 50 кВт каждый и высоковольтные аккумуляторные батареи емкостью 20 кВт·ч и пиковой выходной мощностью 80 кВт. Испытания этого автомобиля показали, что он имеет запас хода 758 км при емкости бака 95 литров. А тактический автомобиль армии США HUMVEE имеет запас хода только 520 км. На одном из военных полигонов Shadow RST-V установил рекорд по прохождению трассы с препятствиями – 15 мин. 50 с. HUMVEE проходил эту трассу за 32 мин. Кроме того, следует отметить возможность Shadow RST-V в «скрытном» режиме на аккумуляторных батареях перемещаться на 30 км. При этом значительно уменьшаются шум и тепловой след от машины.

В 2005 году компания Oshkosh Truck представила тяжелый грузовик повышенной проходимости для технической поддержки НЕМТТ-А3 [18], на котором установлены ДД мощностью 331 кВт, полнопоточная ЭТ, а в качестве НЭ применяются ионисторы емкостью 416 Вт·ч. Испытания НЕМТТ-А3 показали, что он расходует на 20 % меньше топлива в сравнении с грузовиком НЕМТТ-А2, на котором установлены ДД и ГМТ. Запас хода у НЕМТТ-А3 увеличился на 129 км. Также стоит отметить, что НЕМТТ-А3 по весу на 1,3 т легче НЕМТТ-А2 при одинаковой грузоподъемности в 13 т. Это получилось благодаря применению более легкого и менее мощного двигателя, а также упрощению конструкции трансмиссии и применению легких высокопрочных материалов. При этом НЕМТТ-А3 по тягово-скоростным характеристикам превосходит НЕМТТ-А2. Еще к преимуществам конструкции НЕМТТ-А3 стоит отнести то, что замена ДД в полевых условиях занимает 20 минут, а на НЕМТТ-А2 до 24 часов. Эту возможность дает модульная конструкция силовой установки, которую можно было получить только благодаря отсутствию жестких механических связей в ЭТ.

На имеющихся НЭ НЕМТТ-А3 может переместиться только на 400 м. Для «скрытного» перемещения это небольшое расстояние. Да и цели перед ним такой не ставят. А вот в случае выхода из строя ДД на поле боя этого расстояния достаточно для того, чтобы НЕМТТ-А3 мог спрятаться в укрытие.

И еще одна особенность. В стационарных условиях НЕМТТ-А3 можно использовать как электростанцию, которая способна вырабатывать 200 кВт энергии для внешних потре-

бителей. Это может быть полезным в случае выполнения полевого ремонта ВМ, а также при развертывании в полевых условиях командных пунктов, госпиталей, военных баз и т.д. Несмотря на более высокую стоимость НЕМТТ-А3 в сравнении с предшественником, он все равно привлекает интерес у военных благодаря его разносторонним возможностям.

В 2009 году компании Flybrid Systems, Torotrak и Xtrac внедрили на гоночных автомобилях Формулы-1 систему рекуперации кинетической энергии (KERS) на основе высокоскоростного маховика, выполненного из стали и углеродного волокна и вращающегося в вакуумной камере со скоростью до $60\,000\text{ мин}^{-1}$ [19]. А в 2011 году британской компанией Optare совместно с компаниями Torotrak, Ricardo, Allison Transmission в британском городе Корби в сентябре 2011 года на выставке «Low Carbon Vehicle 2011» был представлен автобус Optare Solo Midibus с автоматизированной гидромеханической коробкой передач, подключенной к одной оси и маховичным накопителем энергии, подключенным через тороидальный вариатор скорости ко второй оси [20]. Маховик при замедлении автобуса раскручивается в вакуумном корпусе на магнитных подвесах с малым трением до $60\,000\text{ мин}^{-1}$, а при разгоне отдает всю свою энергию автобусу. Конструкция маховика подобна конструкции в системе KERS и способна передавать в обе стороны до 60 кВт энергии, накопленной при торможении. Она имеет массу 48 кг и может запасать до 267 Вт·ч энергии. По утверждению представителей компании Optare, автобус с новой системой экономит более 10% топлива, а выбросы углекислого газа снизились на 20%. Причиной внедрения такой конструкции является высокая стоимость тягового электропривода с накопителями электрической энергии для ТМ. Например, стоимость комплекта тягового электропривода с ионисторами в качестве НЭЭ для автобуса ЛиАЗ-5292Х при выпуске более 100 комплектов в год составляет 58 000 \$ [21]. А стоимость ГМТ с механической системой рекуперации энергии составляет 36 000 \$.

Еще необходимо отметить такое направление повышения топливной экономичности ВМ, как внедрение на них преобразователя тепловой энергии в электрическую (ПТЭ). Особенно это будет целесообразно в случае применения ЭТ на ВМ. Как уже отмечалось, от ДД в виде тепла рассеивается около 60% энергии. Поэтому применение ПТЭ позволит повысить КПД дизеля.

Уже разработано несколько различных конструкций термоэмиссионных, полупроводниковых ПТЭ, а также преобразователей на основе концентрационного электрохимического или газового элементов для применения в солнечной энергетике или создания автономных источников энергии. Некоторые конструкции преобразователей запатентованы – патенты РФ №2136086, 1998; США №4677038, 1982 и т.д. Но, к сожалению, ни одна из конструкций пока что не удовлетворяет по массогабаритным требованиям или ресурсу работы и величине КПД для применения на ВМ. Поэтому необходимо дальнейшее развитие технологий в этом направлении.

Заключение. Проведенный анализ характеристик ДД и трансмиссий ТМ, а также уровня технологий, которые применяются в машиностроении, показал:

1. ЭТ переменного тока с синхронными ТЭД обеспечивает наилучшую тяговую характеристику ВМ, а также поддерживает работу ДД в области минимального удельного эффективного расхода топлива и максимального эффективного крутящего момента. Однако ее КПД на стационарных режимах движения не превышает 83%, а электрические агрегаты имеют высокую стоимость.

2. ГМТ дешевле в изготовлении в сравнении с ЭТ переменного тока и обеспечивает ВМ разгонную характеристику аналогичную как в случае с ЭТ переменного тока. На стационарных режимах движения, при сблокированном гидротрансформаторе, ве-

личина КПД может достигать 92%. Для получения высокой тяговой характеристики у ВМ с ГМТ, подобной как у ВМ с ЭТ переменного тока, прямопоточные ГМП необходимо дополнять 2-х поточными гидрообъемными механизмами поворота, как на гусеничных, так и на колесных ВМ.

Недостатком ГМТ является отсутствие способности поддерживать работу ДД в области минимального удельного эффективного расхода топлива и максимального свободного крутящего момента. Она допускает неэкономичную работу ДД в случае получения максимальной скорости движения ВМ. Также наличие жестких механических связей между элементами трансмиссии ограничивает возможности в компоновке ВМ и уменьшает ее внутреннее пространство по сравнению с ЭТ.

3. Для повышения как топливо-экономичных, так и тягово-скоростных характеристик ВМ необходимо ЭТ и ГМТ дополнять системами рекуперации электрической и кинетической энергии, получаемой при торможении или движении на спуске ВМ. В результате получаем так называемые гибридные силовые установки для ВМ, в которых для движения используется два и более источника энергии.

4. Если гибридную силовую установку, состоящую из ЭТ переменного тока и НЭЭ применять на ВМ только с целью получения высоких тягово-скоростных и топливо-экономичных характеристик ВМ, то это в настоящее время экономически не целесообразно. Потому что технология изготовления гибридного электропривода для ТМ пока что очень дорогая и окупиться такая силовая установка может только через много лет интенсивной эксплуатации ТМ, что не приемлемо для ВМ.

А вот если использовать дополнительные возможности гибридного электропривода – работать в режиме электростанции, несколько километров «скрытно» передвигаться на НЭЭ в случае проведения разведки или выехать из под обстрела на НЭЭ в случае выхода из строя основного двигателя, то ее логично применять на ремонтных, ремонтно-эвакуационных или боевых разведывательных ВМ. В этом случае более высокая стоимость гибридной силовой установки на основе ЭТ в сравнении с гибридной силовой установкой на основе ГМТ оправдывается новыми боевыми свойствами ВМ.

На остальных боевых ВМ (танки, бронетранспортеры, боевые машины пехоты, броневые автомобили) экономически оправдано применение гибридной силовой установки, состоящей из ГМТ и системы рекуперации энергии торможения машины.

Выводы.

1. В настоящее время перспективным направлением повышения тягово-скоростных и топливо-экономичных характеристик ВМ является внедрение гибридных силовых установок на ВМ, которые состоят из дизельного двигателя, ГМТ или ЭТ, и системы рекуперации энергии торможения машины.

2. На Украине необходимо развивать и удешевлять технологии по изготовлению ТЭД и тяговых генераторов переменного тока, систем управления тяговым электроприводом, а также накопителей электрической и механической энергии для ТМ.

3. Необходимо создать конструкцию преобразователя тепловой энергии в электрическую, который возможно разместить в системе охлаждения дизельного двигателя на ВМ. Это позволит дополнительно повысить топливную экономичность ВМ.

Литература: 1. Александров Е.Е. Быстроходные гусеничные и армейские колёсные машины: Краткая история развития. / Е.Е. Александров, В.В. Епифанов – Харьков: НТУ "ХПИ", 2001. – 375 с. 2. Энергетические установки колесных и гусеничных машин. Книга 2. Автоматическое управление транспортными двигателями внутреннего сгорания: [учеб. пособие для студ. высш. учеб. зав.] / [Александров Е.Е., Белогуб А.В., Белогуб В.В. и др.]; под ред. Е.Е. Александрова – Харьков: ХГПУ, 1996. – 548 с. 3. Александров Е.Е. Перспективы применения гидромеханической транс-

миссии с микропроцессорной системой управления на военных машинах / Е.Е. Александров, С.В. Стримовский // *Механіка та машинобудування*. – 2006. – №1. – С. 92–98. 4. Данов Б.А. Электронное оборудование иностранных автомобилей: Системы управления трансмиссией, подвеской и тормозной системой / Б.А. Данов, Е.И. Титов. – М.: Транспорт, 1998. – 78 с. 5. Тягово-скоростные характеристики быстроходных гусеничных и полноприводных колесных машин: Теория и расчет: [учеб. пособие для студ. высш. учеб. зав.] / [Александров Е.Е., Епифанов В.В., Медведев Н.Г., Устиненко А.В.]; под ред. В.В. Епифанова – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 124 с. 6. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин / [Александров Е.Е., Волонцевич Д.О., Карпенко В.А. и др.]; под ред. А.Н. Туренко. – Харьков: ХГАДТУ(ХАДИ), 2001. – 642 с. 7. Гулия Н.В. Новый многодисковый вариатор с «мягкой» рабочей характеристикой / Н.В. Гулия, С.А. Юрков // *Наука и техника*. – 2001– №3. – С. 52–58. 8. Гулия Н.В. Супервариатор – перспективная бесступенчатая коробка передач для автомобилей / Н.В. Гулия, И.В. Бессуднов // *Наука и техника*. – 2004. – №3. – С. 31–37. 9. Александров Е.Е. Колесные и гусеничные машины высокой проходимости. Бесступенчатые трансмиссии. Расчет и основы конструирования: [учеб. пособие для студ. высш. учеб. зав.] / [Александров Е.Е. Самородов В.Б., Волонцевич Д.О., Палащенко А.С.]; под ред. Е.Е. Александрова – Харьков: ХГПУ, 1997. – 185 с. 10. Бусыгин Б.П. Электромобили. Методы расчета: [учеб. пособие для студ. высш. учеб. зав.] / Борис Павлович Бусыгин. – М.: МАДИ, 1979. – 72 с. 11. Материалы с сайта <http://www.brusa.biz>, 2012. 12. Богданов К.Л. Тяговый электропривод автомобиля / Константин Леонидович Богданов. – М.: МАДИ, 2009. – 57 с. 13. Бусяк Ю.М. Перспективы развития трансмиссий военных бронированных машин / Ю.М. Бусяк, А.И. Веретенников, А.М. Завадский и др. // *Механіка та машинобудування*. – 2004. – №1. – С. 102–106. 14. Хортов В.П. И все же поедет на конденсаторе / Вячеслав Петрович Хортов // *Изобретатель и Рационализатор*. – 1990. – №5. – С. 12–15. 15. Боси Р. Автомобильный справочник BOSCH: [справ. пособие для студ. высш. учеб. зав. и инж.] / Роберт Боси. – [1-е изд.]. – пер. с англ. Ф.П. Тарасенко. – М.: За рулем, 2002. – 895 с. 16. Автомобиль 21 века – Toyota Prius с гибридным мотором. – <http://japcar.ru>, 2001. 17. Сергей Вэй Военное применение гибридных электроприводов http://army_guide.com, 2005. 18. The Oshkosh Hybrid Truck. – http://hybrid_vehicle.org, 2005. 19. Давыдов В.В. Радикальное увеличение эффективности силовой установки гибридного автомобиля / В.В. Давыдов, А.И. Лавреньев // *Наука и техника*. – 2011 – №2. – С. 11–18. 20. Материалы с сайта <http://phusorg.com>, 2012. 21. Материалы с сайта <http://www.ruselprom.ru>, 2012.

Bibliography (transliterated): 1. Aleksandrov E.E. Bystrohodnye gusenichnye i armejskie koljosnye mashi-ny: Kratkaja istorija razvitija. / E.E. Aleksandrov, V.V. Epifanov –Har'kov: NTU "HPI", 2001. – 375 s. 2. Jenergeticheskie ustanovki kolesnyh i gusenichnyh mashin. Kniga 2. Avtomaticheskoe upravlenie transportnymi dvigateljami vnutrennego sgoranija: [ucheb. posobie dlja stud. vyssh. ucheb. zav.] / [Aleksandrov E.E., Belogub A.V., Belogub V.V. i dr.]; pod red. E.E. Aleksandrova – Har'kov: HGPU, 1996. – 548 s. 3. Aleksandrov E.E. Perspektivy primenenija gidromehaničeskoj trans-missii s mikroprocessornoj sistemoj upravlenija na voennyh mashinah / E.E. Aleksandrov, S.V. Strimovskij // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2006. – №1. – S. 92–98. 4. Danov B.A. Jelektron-noe oborudovanie inostrannyh avtomobilej: Sistemy upravlenija transmissiej, podveskoj i tormoznoj sistemoj / B.A. Danov, E.I. Titov. – M.: Transport, 1998. – 78 s. 5. Tjagovo-skorostnye harakteristiki bystrohodnyh gusenichnyh i polnoprivodnyh kolesnyh mashin: Teo-rija i raschet: [ucheb. posobie dlja stud. vyssh. ucheb. zav.] / [Aleksandrov E.E., Epifanov V.V., Medve-dev N.G., Ustinenko A.V.]; pod red. V.V. Epifanova – Har'kov: NTU «HPI», 2007. – 124 s. 6. Dina-mika transportno-tjagovyh kolesnyh i gusenichnyh mashin / [Aleksandrov E.E., Voloncevich D.O., Karpenko V.A. i dr.]; pod red. A.N. Turenko. – Har'kov: HGADTU(HADI), 2001. – 642 s. 7. Gulija N.V. Novyj mnogodiskovyj variator s «mjagkoj» rabochej harakteristikoj / N.V. Gulija, S.A. Jurkov // *Nauka i tehnik*. – 2001– №3. – S. 52–58. 8. Gulija N.V. Supervariator – perspektivnaja besstu-penčataja korobka peredach dlja avtomobilej / N.V. Gulija, I.V. Bessudnov // *Nauka i tehnik*. – 2004 – №3. – S. 31–37. 9. Aleksandrov E.E. Kolesnye i gusenichnye mashiny vysokoj prohodimosti. Bes-stupenchatye transmissii. Raschet i osnovy konstruirovanija: [ucheb. posobie dlja stud. vyssh. ucheb. zav.] / [Aleksandrov E.E. Samorodov V.B., Voloncevich D.O., Palashenko A.S.]; pod red. E.E. Aleksandrova – Har'kov: HGPU, 1997. – 185 s. 10. Busygin B.P. Jelektromobili. Metody ras-cheta: [ucheb. posobie dlja stud. vyssh. ucheb. zav.] / Boris Pavlovich Busygin. – M.: MADI, 1979. – 72 s. 11. Materialy s sajta <http://www.brusa.biz>, 2012. 12. Bogdanov K.L. Tjagovyj jelektroprivod av-

tomobilja / Konstantin Leonidovich Bogdanov. – M.: MADI, 2009. – 57 s. 13. Busjak Ju.M. Perspektivy razvitiya transmissij voennyh bronirovannyh mashin / Ju.M. Busjak, A.I. Veretennikov, A.M. Zavadskij i dr. // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2004. – №1. – S. 102–106. 14. Hortov V.P. I vse zhe poedem na kondensatore / Vjacheslav Petrovich Hortov // *Izobretatel' i Racionalizator*. – 1990. – №5. – S. 12–15. 15. Bossh R. Avtomobil'nyj spravocnik BOSCH: [sprav. posobie dlja stud. vyssh. ucheb. zav. i inzh.] / Robert Bossh. – [1-e izd.]. – per. s angl. F.P. Tarasenko. – M.: Za rulem, 2002. – 895 s. 16. Avtomobil' 21 veka – Toyota Prius s gibridnym motorom. – <http://japcar.ru>, 2001. 17. Sergej Vvej Voennoe primenenie gibridnyh jelektroprivodov http://army_guide.com, 2005. 18. The Oshkosh Hybrid Truck. – http://hybrid_vehicle.org, 2005. 19. Davydov V.V. Radikal'noe uvelichenie jefektivnosti silovoj ustanovki gibridnogo avtomobilja / V.V. Davydov, A.I. Lavren'-t'ev // *Nauka i tehnika*. – 2011 – №2. – S. 11–18. 20. Materialy s sajta <http://phusorg.com>, 2012. 21. Materialy s sajta <http://www.ruselprom.ru>, 2012.

Стрімовський С.В.

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ТЯГОВО-ШВИДКІСНИХ ТА ПАЛИВО-ЕКОНОМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІЙСЬКОВИХ МАШИН

У статті виконано аналіз тягово-швидкісних характеристик військових машин з дизельним двигуном та різними видами трансмісій. Розглянуті конструктивні особливості трансмісій. Також проведений аналіз сучасного рівня технологій, які у даний час застосовуються в машинобудуванні при створенні силових установок для транспортних машин. Запропоновано подальші заходи, які дозволять підвищити тягово-швидкісні та паливо-економічні характеристики військових машин.

Стримовський С.В.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЯГОВО-СКОРОСТНЫХ И ТОПЛИВО-ЭКОНОМИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЕННЫХ МАШИН

В статье выполнен анализ тягово-скоростных характеристик военных машин с дизельным двигателем и разными видами трансмиссий. Рассмотрены конструктивные особенности трансмиссий. Также проведенный анализ современного уровня технологий, которые в данное время применяются в машиностроении при создании силовых установок для транспортных машин. Предложены дальнейшие мероприятия, которые разрешат повысить тягово-скоростные и топливо-экономические характеристики военных машин.

Strimovskiy S.V.

ADVANCED DIRECTION INCREASE TRACTIVE, VELOCITY AND FUEL-EFFICIENT CHARACTERISTICS MILITARY VEHICLES

In article to be analysed tractive and velocity characteristics military vehicles with diesel engine and different kind transmissions. The constructions transmissions, is examined. Also to be analysed modern technology, which now used in machine-building for making power-plants on vehicles. To be propose further operations for increase tractive, velocity and fuel-efficient characteristics military vehicles.
