

Рис. 4. Концепция CALS-технологий

ИТС и CALS-технологии: есть ли сходство? ИТС развиваются по аналогичному с CALS пути: использование информационно-коммуникационных технологий, создание единого информационного пространства, замена бумажного документооборота на электронный. ИТС также обладают большим потенциалом, так как опираются на бурно развивающиеся информационные, телекоммуникационные, авиационные, космические и другие высокие технологии. Существует вероятность, что в будущем ИТС и CALS будут взаимодействовать, так как цели и подходы у них близкие. В БНТУ открывается подготовка специалистов по интеллектуальным транспортным системам и CALS-технологиям.

ВЫВОД

Долгосрочная концепция развития транспорта должна опираться на передовые достижения науки и техники. При разработке долгосрочной концепции инновационного развития транспорта необходимо учитывать реальные возможности Республики Беларусь, а в качестве основной идеи использовать интеллектуальные транспортные системы. Концепцию долгосрочного инновационного развития транспорта создавать с позиций ИТС.

Поступила 13.06.2013

УДК 621.26:629.244:629.2293

ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ И БИРОТАТИВНОЙ ЭЛЕКТРОМАШИНОЙ

Канд. техн. наук, доц. МИХАЙЛОВ В. В., магистр техн. наук СНИТКОВ А. Г.

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»

-mail: valeru.mikhailov@gmail.com

POSSIBILITIES FOR AUTOMATIC CONTROL OF HYDRO-MECHANICAL TRANSMISSION AND BIROTATING ELECTRIC MACHINE

MIKHAILOV V. V., SNITKOV A. G.

*SSI (State Scientific Institution) "Joint Institute of Mechanical Engineering
of National Academy of Sciences of Belarus"*

Ключевые слова:

Fig. 9. Ref.: 13 titles.

The paper presents mathematical models and results of virtual investigations pertaining to the selected motion parameters of a mobile machine equipped with hydro mechanical and modernized transmissions. The machine has been tested in similar technological cycles and it has been equipped with a universal automatic control system. Changes in structure and type of power transmission have been obtained with the help of a control algorithm including an extra reversible electric machine which is switched in at some operational modes.

Implementation of the proposed concept makes it possible to obtain and check the improved C-code of the control system and enhance operational parameters of the transmission and machine efficiency, reduce slip-page and tire wear while using braking energy for its later beneficial use which is usually considered as a consumable element.

Keywords: hydro mechanical transmission, hybrid, automatic control, electric machine, mathematical model.

Fig. 9. Ref.: 13 titles.

Введение. На современном этапе развития трансмиссий мобильных машин повышенный интерес вызывает альтернативный, преимущественно гибридный привод. Для условий движения машин с высокой цикличностью такой привод в первую очередь обеспечивает понижение расхода топлива и уменьшение выброса вредных веществ в окружающую среду, возможность рекуперации энергии торможения и создания предпосылок для использования ДВС меньшего объема. В то же время по ряду причин коммерческого и технологического характера производители не могут отказаться от обычных гидромеханических трансмиссий.

Возможность использовать ту или иную структуру силового потока трансмиссий зависит от условий эксплуатации машин и обычно обеспечивается применением электрических машин, работающих в комбинации с трансмиссией параллельно, последовательно, либо смешанным образом [1]. Электромашины позволяют сохранять, накапливать и эффективно использовать в дальнейшем энергию движения. Понятно, что переход к альтернативной схеме и обратно производится исходя из экономической и практической целесообразности [2].

Важной особенностью обоснования предпочтений в типах применяемых трансмиссий является разработка методов оценки их эффективности при использовании уже известных алгоритмов, механических, электрических, гидравлических устройств, а также определение ожидаемого эффекта применения комплекса при движении на типовых маршрутах и временных отрезках. При этом следует учесть, что эффективная работа мобильной машины во многом обеспечивается качеством алгоритма

управления, носителем которого является генерируемый С-код [3].

Несмотря на изученность вопроса функционирования автоматических или гибридных схем силовых передач по отдельности, возможность совмещения универсальной системой управления этих двух типов трансмиссий на едином шасси мобильной машины до настоящего времени не изучалась. В статье анализируется изменение некоторых параметров движения мобильной машины с автоматической гидромеханической передачей путем управляемого использования электромашины в силовом контуре. Кроме того, апробирована возможность создания и оценки работоспособности С-кода для такой автоматической системы управления.

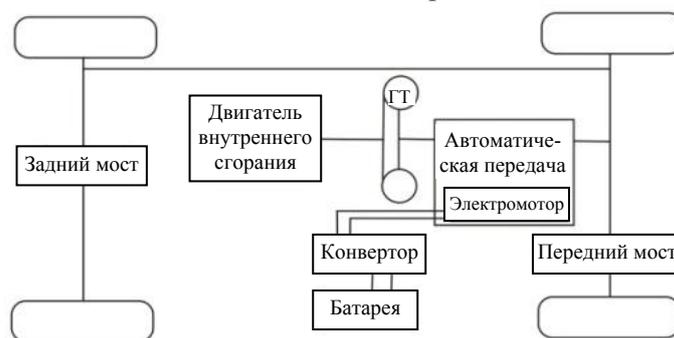
Выбор схемы и рабочих модулей SIL (Software in the Loops)-системы. В [4, 5] подробно детализированы и представлены узлы гидромеханической трансмиссии (ГМТ) мобильной машины и ее математический аналог, предназначенные для работы в едином комплексе испытаний и отладки компонентов системы автоматического управления (САУ). Основные блоки комплекса реализованы для MatLab/Simulink.

Виртуальный рабочий цикл исследований ГМТ включает трогание, разгон, переключение передач, торможение в автоматическом режиме, а также выполнение технологической операции в условиях циклически изменяющегося сопротивления. Схема расположения узлов и элементов ГМТ с непрозрачным гидротрансформатором применительно к приводу ведущих колес самоходного погрузчика представлена в [4].

При разработке и сравнении моделей ГМТ и альтернативной конструкции учитывали следующее:

- под термином «электрическая машина» понимается электрическая машина с оборудованием, обеспечивающим необходимые электрические соединения для сбора и хранения электрической энергии при переключениях с тягового режима в тормозной (генераторный) режим и обратно; используя САУ фрикционными узлами ГМТ, становится возможным управлять «степенью участия» электромашин в процессе движения;
- режимы движения мобильной машины определяются системой автоматического управления ГМТ;
- гибридная силовая установка (ГСУ) формируется комбинацией подключения двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и электрической машины;
- известно и экспериментально установлено, что до 40 % механической мощности ДВС должно рассеиваться при торможении [1];
- для САУ была апробирована технология торможения путем включения нескольких передач и образования замкнутого контура в ГМТ [6];
- смешанная система управления [1] позволяет осуществлять периодическое воздействие на вал трансмиссии, постоянно связанный с движителем мобильной машины.

Функциональная схема альтернативной ГМТ с электромашинной (ГСУ смешанного типа) представлена на рис. 1.



Режим	Включение агрегата			
	ДВС + ГМТ	Генератор	Э/мотор	Батарея
Торможение			●	← ●
Разгон	●	● →	→ ● ←	← ●
Движение	●	● →	→ ●	→ ●

При торможении контроллер САУ ГМТ распознает начало торможения по изменению положения педали рабочего тормоза. При этом САУ управляет фрикционными ГМТ так, что в последней формируется замкнутый контур, к которому подключается электрическая машина, и одновременно переводится в генераторный режим, что обеспечивает накопление энергии торможения в аккумуляторах. Такое решение существенно изменяет технологические возможности самой силовой передачи. В генераторном режиме при появлении напряжения на обмотках электромашин вырабатывается электрический ток и одновременно возникает тормозной момент за счет создания и изменения электромагнитного поля между вращающимися обмотками ротора и статора. В тяговом режиме, наоборот, электромашин потребляет электрическую энергию, заставляя раскручиваться ротор и статор в разные стороны с одинаковым крутящим моментом, обеспечивая дополнительную мощность на привод ведущих колес. Различный темп нарастания тормозного момента получают регулированием задержек и цикличности управления как фрикционными, так и электрической машины.

Расчетная модель ГМТ с автоматическим управлением представлена на рис. 2 блок-схемой, подготовленной для встроенного решателя MatLab/Simulink [5].

Модель электромашин, присоединенной к ГМТ с образованием гибридного силового привода (ГСУ смешанного типа), представлена на рис. 3.

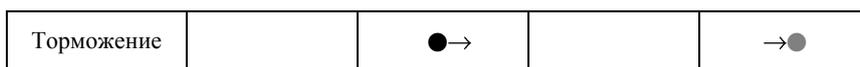


Рис. 1. Функциональная схема альтернативной ГМТ с электромашинной – перспективная гибридная силовая установка

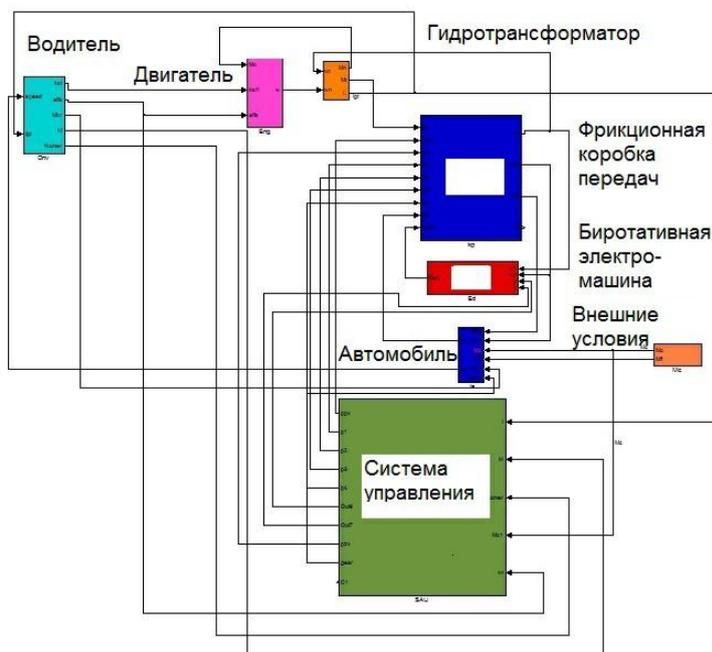


Рис. 2. Блок-схема автоматической ГМТ, реализованная в MatLab/Simulink

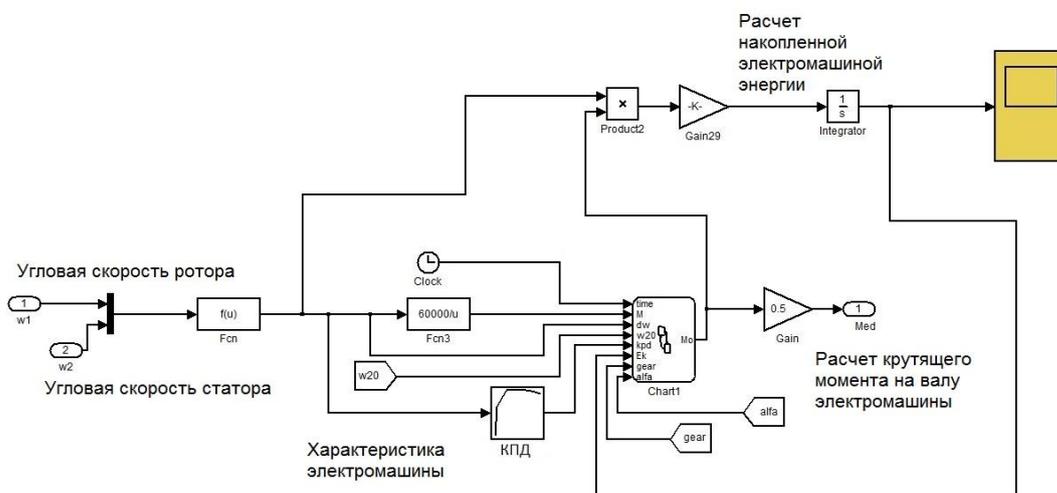


Рис. 3. Модель (подсистема) реверсивной электромашинной мощностью 60 кВт, реализованная в MatLab/Simulink

В [5] представлены исходные значения основных инерционных параметров и жесткостей, использованные при моделировании движения самоходного погрузчика переменной массой до 16 т с ГМТ.

Зависимость КПД от скорости согласно [7] показывает достаточную стабильность силовых

характеристик в рабочем диапазоне частот ГМТ, и несмотря на нелинейность параметров динамической системы [8], такая схема вполне пригодна для организации совместной работы. Дополнительный анализ [9–12] позволил сформировать оптимизированные кривые момента и КПД тягового асинхронного двигателя мощно-

стью 60 кВт, как это было представлено в других работах и ниже на рис. 4, 5.

Полезная нагрузка, дорожные, климатические, метеорологические, эксплуатационно-технические и прочие условия эксплуатации мобильных транспортных средств оказывают основное влияние на скорости их движения и расходы топлива.

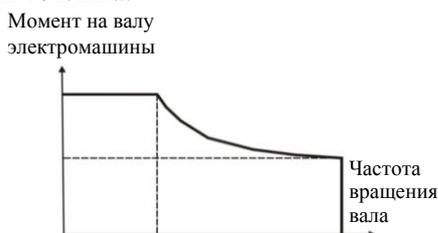


Рис. 4. Вид тяговой характеристики электромашин согласно [11]

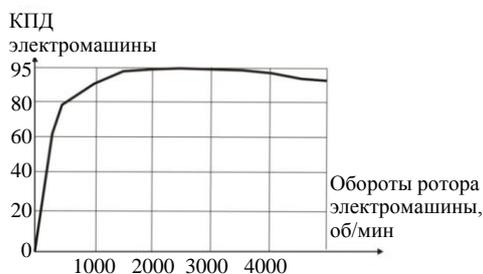
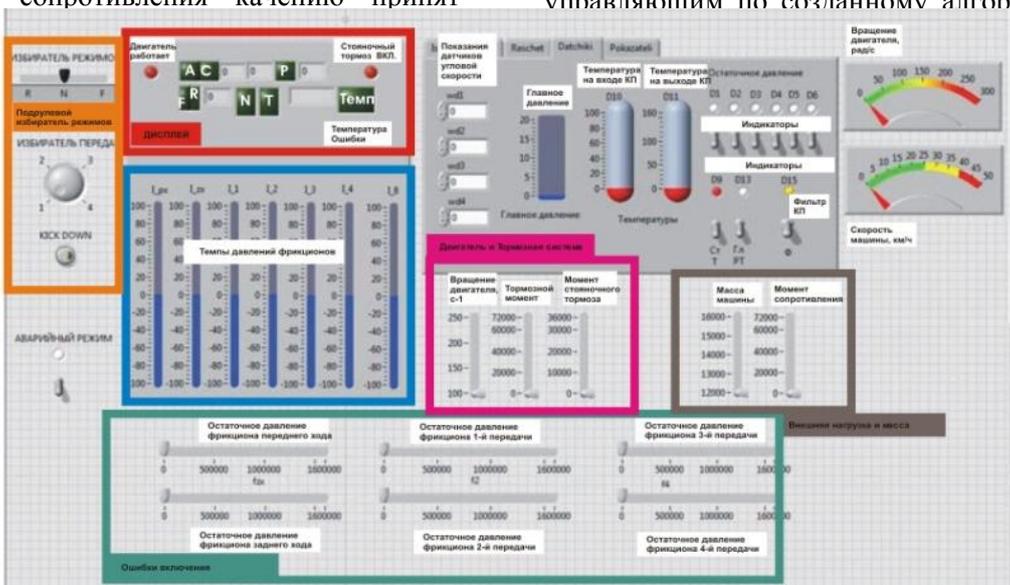


Рис. 5. Зависимость КПД от частоты вращения для электромашин мощностью 60 кВт [12]

При испытаниях по SIL-технологии параметры системы были зафиксированы во времени по этапам, как показано на рис. 6. Полный цикл движения машины назначался 60 с. Коэффициент сопротивления качению принят равным 0,0

Проведено по СИ комплекса



управления и среды проведения сравнительных испытаний автоматической ГМТ и альтернативной ГСУ, оснащенных электронным блоком управления, алгоритмом, органами управления, двигателем, модулем формирования внешних сопротивлений, также генератором, представле

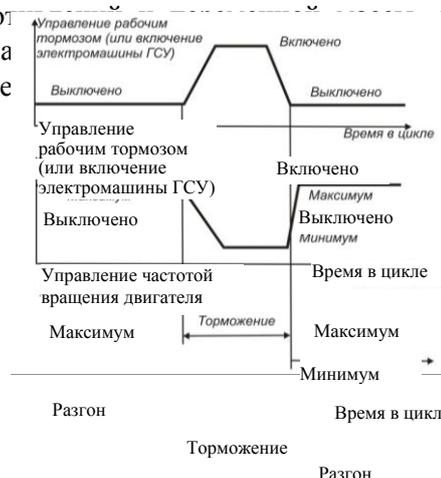


Рис. 6. Управление рабочим процессом в едином технологическом цикле сравнительных испытаний

Основой этого комплекса является детализированная модель гидромеханического привода ведущих колес, созданная и проверенная в MatLab/Simulink. Последующий переход к полунатурному стенду был осуществлен путем интегрирования моделей трансмиссии и машины в LabVIEW и сочетания на этой платформе физических макетов органов управления, двигателя, дисплея, сопряженных с контроллером, управляющим по созданному алгоритму тока-

ционально-Hardware

Рис. 7. Общий вид панели управления виртуального стенда

Большинство элементов комплекса физически имитируют работу реальных органов управления и взаимодействуют через реальный контроллер ЭБУ [10], который через USB-порт связан с HOST-компьютером. Другой компьютер сети этого кластера имитирует в реальном времени работу трансмиссии и электропривода, реализуя движение машины по заданному алгоритму с отражением всех необходимых параметров на дисплее, являясь своего рода источником информации для контроллера в виде генерированных «частот вращения валов» трансмиссии. Тактовая частота контроллера, шаг счета решения системы дифференциальных уравнений и частота опроса датчиков ЭБУ назначены постоянными. При этом экспериментально были подобраны несущие частоты ШИМ-сигнала, при которых силовые токи обмоток электромагнитов обеспечивали наилучшее соответствие токам управления.

В результате исследований были произведены виртуальные экспериментальные заезды самоходной машины с автоматической ГМТ и альтернативной ГСУ, оснащенной электромашинной мощностью 60 кВт, в технологических циклах, включающих штатное (ГМТ) и рекуперативное (ГСУ) торможения. Этот процесс в обоих случаях производился с одинаковым замедлением для достижения равного запаса энергии.

Параметры машины приняты следующими: масса машины – 12 т; мощность основного двигателя – 120 кВт; мощность электромшины – 60 кВт; передаточные числа: ведущего моста – 16,070; коробки передач – 4,779; 2,549; 1,341; 0,794; радиус качения колеса – 0,650 м.

Виртуальные испытания проводили в последовательности, как представлено на рис. 6.

1. Погрузчик осуществляет разгон на поверхности с постоянным коэффициентом сопротивления 0,05.

2. В течение 30 с разгона происходит автоматическое переключение передач в ГМТ.

3. Начиная с 31 с производится вынужденное понижение скорости до 6 км/ч, полагая, что обеспечивается требуемое замедление. В первом случае снижение скорости происходит с помощью рабочей тормозной системы при автоматическом понижении ступеней ГМТ. Для другого случая понижение скорости производится подключением ГСУ и рабочей тормозной системой также с автоматическим понижением ступеней.

4. После торможения выполняется разгон машины с фиксацией достигнутой максимальной скорости и некоторых других параметров, которые подлежат сравнению.

Результаты сопоставления автоматической ГМТ и альтернативной ГСУ на основе универсальной системы управления с обычным и рекуперативным торможениями показаны на рис. 8, 9. На каждой из фигур последовательно представлены: а – угловые скорости двигателя, турбинного колеса и выходного вала коробки передач; б – скорости движения машины; в – момента генератора/электродвигателя; г – значения ускорения/замедления/ускорения в цикле движения; д – накопление/расходование энергии торможения электромашинной; е – передаточное отношение коробки передач на каждой ступени.

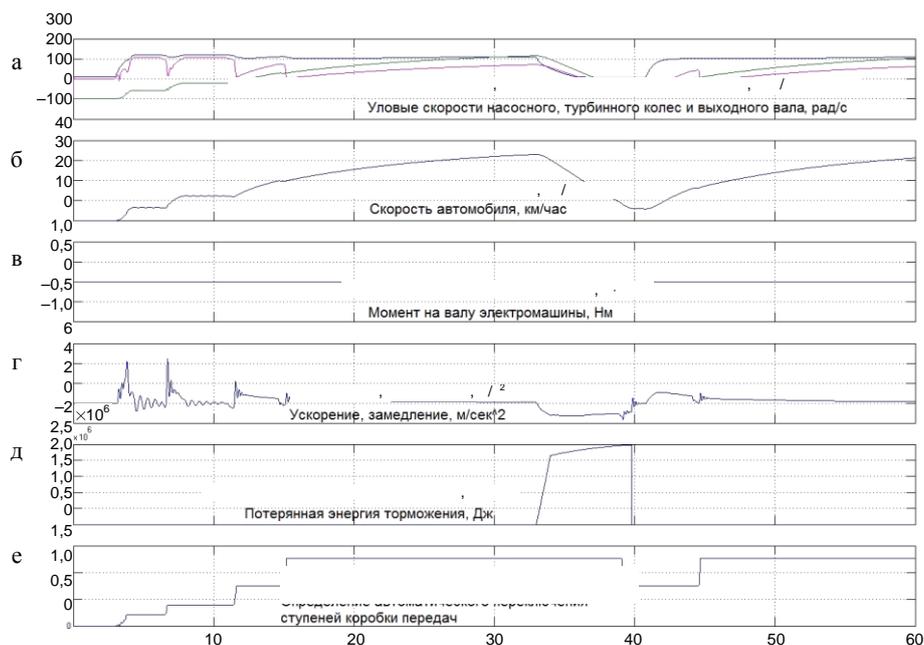


Рис. 8. Движение машины с автоматической ГМТ со штатной рабочей тормозной системой для понижения скорости в цикле

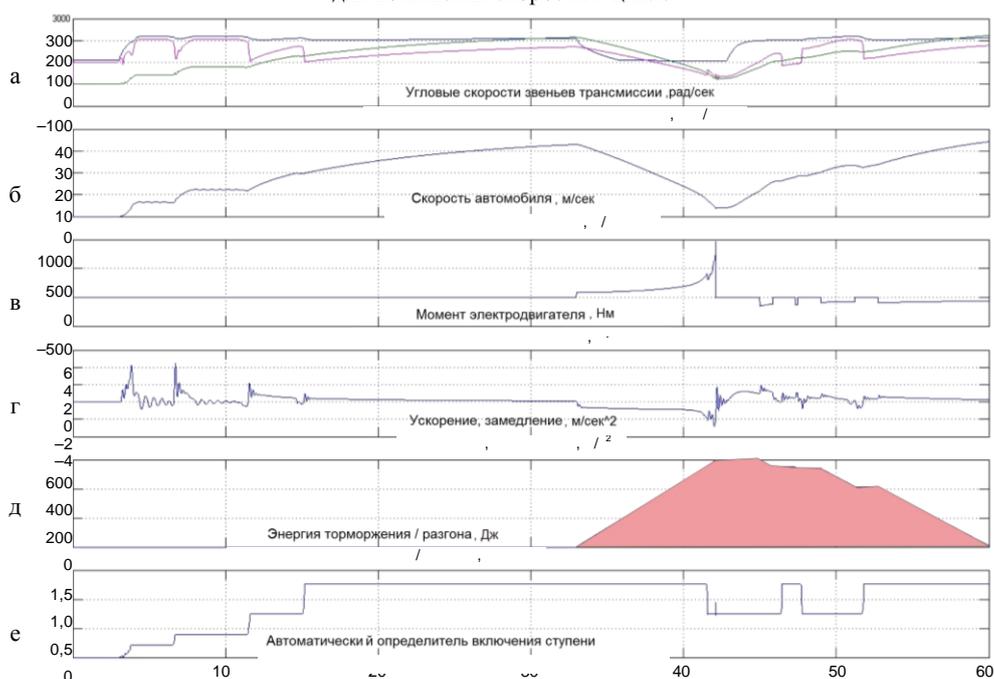


Рис. 9. Движение самоходного погрузчика с альтернативной ГСУ и рекуперацией энергии

Сравнение результатов исследований показывает, что для альтернативной ГСУ максимальная скорость в конце цикла составила 32,67 км/ч. Зафиксированный пройденный путь – 342 м. При этом было израсходовано топлива на движение 0,3352 кг. Для движения с автоматической ГМТ и штатной тормозной системой те же параметры составили соответственно: 31,140 км/ч; 334,000 м и 0,329 кг.

Нет сомнения, что производительность и эффективность альтернативной ГСУ выше. Окончательное решение о модернизации трансмиссии должно производиться на основании сопоставления суммарных стоимостных показателей изготовления машины и выполненной работы в пересчете на срок ее службы.

ВЫВОДЫ

1. На основе автоматической гидромеханической трансмиссии, оснащенной дополнительной электрической машиной, предложена и апробирована технология получения альтернативной гибридной силовой установки с рекуперативными свойствами для машин, эксплуатируемых в условиях высокой цикличности движения. Для обоих вариантов был использован универсальный алгоритм управления переключениями ступеней гидромеханической трансмиссии.

2. Представлена детализированная динамическая модель альтернативной гибридной силовой установки, функционирующая на основе автоматической гидромеханической передачи в среде MatLab/Simulink, позволяющая анализировать основные кинематические и силовые параметры энергетических потоков трансмиссии на любых режимах и циклах.

3. Самоходный погрузчик, оснащенный альтернативной силовой установкой, успешно прошел сравнительные эксплуатационные испытания в едином виртуальном технологическом цикле. Сравнение результатов исследований серийной и перспективной конструкций силового привода позволяет не только понизить нагруженность элементов трансмиссии и тормозной системы за счет перераспределения силовых потоков, но и создать предпосылки для выполнения последующих операций с большей технологической надежностью и запасом энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Никишин, С. В.** Новые гибридные силовые агрегаты для автомобилей / С. В. Никишин // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology ISJAEE. – 2005. – № 8 (28).
2. **SAE Topical Technology Workshop on Hybrid System (THS).** U. S. Environmental Protection Agency Report: EPA 420-R-98-006.
3. **Jaikamal, V.** Advanced Techniques for Simulating ECU – C-code on the PC / V. Jaikamal, T. Zurawka [Электронный ресурс] SAE International. – 2010. – Режим доступа: <http://papers.sae.org/2010-01-0431/> или <http://www.systems.com/unternehmen/documents/SAE%202010-03.pdf>.
4. **Михайлов, В. В.** Повышение эффективности самоходных погрузчиков путем автоматизации управления трансмиссией и выбора рациональных моментов переключения / В. В. Михайлов, В. Н. Басалаев, С. А. Карпыза // Сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Инновации в машиностроении» и VI Междунар. симп. по трибологии МСТФ-2010, Минск, 26–29 окт. 2010 г. / ОИМ

НАН Беларуси; редкол.: М. С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2010. – С. 176–180.

5. **Математическая** модель автоматической трансмиссии в структуре испытательного комплекса / В. В. Михайлов [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 2 (19). – С. 22–28.

6. **Способ** аварийного торможения мобильной машины: пат. РБ № 16501 / В. В. Михайлов, Г. А. Дыко, В. Н. Басалаев; № а20100550; заявл. 09.04.2010.

7. **Тяговый** электропривод в гибридных транспортных средствах. – Ч. 2: Идеология проектирования КТЭО (продолжение, начало см. в ЭК 11) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru/leader/r/review/40498/doc/48465/>

8. **Stanislav, N.** Traction Electric Equipment Set for AC Electric Transmission Various Vehicles / N. Stanislav, S. Florentsev // Proceedings of International Exhibition & Conference “Power Electronics, Intelligent Motion”. Power Quality (PCIM-2009), May 4, 2009, Nuremberg, Germany. – P. 625–627.

9. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Палячик. – Минск: Техноперспектива, 2004. – 527 с.

10. **Меджахед, Дж.** STM32 – капитан команды Cortex-M3 / Дж. Меджахед, Р. Попов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.elcomdesign.ru

11. **Изосимов, Д. Б.** Некоторые особенности проектирования тяговых асинхронных двигателей. – Ч. 1 / Д. Б. Изосимов // Электротехника. – 2004. – № 12. – С. 36–45.

12. **Изосимов, Д. Б.** Некоторые особенности проектирования тяговых асинхронных двигателей. – Ч. 2 / Д. Б. Изосимов // Электротехника. – 2004. – № 12. – С. 46–51.

13. **Михайлов, В. В.** Комплексная система отладки и диагностирования алгоритмов системы автоматического управления гидромеханическими трансмиссиями / В. В. Михайлов, А. Г. Снитков // Актуальные вопросы машиноведения: сбор. науч. тр. – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2012. – Вып. 1. – С. 316–319.

REFERENCES

1. **Nikishin, S. V.** New Hybrid Power Machines for Automobiles / S. V. Nikishin // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology ISJAEE. – 2005. – No 8 (28).
2. **SAE Topical Technology Workshop on Hybrid System (THS).** U. S. Environmental Protection Agency Report: EPA 420-R-98-006.
3. **Jaikamal, V.** Advanced Techniques for Simulating ECU – C-code on the PC / V. Jaikamal, T. Zurawka [Electronic Resource] SAE International. – 2010. – Access Mode: <http://papers.sae.org/2010-01-0431/> or <http://www.systems.com/unternehmen/documents/SAE%202010-03.pdf>
4. **Mikhailov, V. V.** Improvement of Self-Propeller Loader Efficiency while Using Transmission Automation Control and Selection of Rational Switching Torques / V. V. Mikhailov, V. N. Basalaev, S. A. Karpyza // Proceedings of International Scientific and Technical Conference “Innovations and Mechanical Engineering” and 6th International Symposium on Tribophysics MSTF-2010, Minsk, October 26–29, 2010 / Joint

Institute of Mechanical Engineering NAS Belarus; Editorial Board: M. S. Vysotsky [et al.]. – Minsk, 2010. – P. 176–180.

5. **Mathematical** Model of Automatic Transmission in Structure of Test Complex / V. V. Mikhailov [et al.] // *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. – 2012. – No 2 (19). – P. 22–28.

6. **Method** of Mobile Machine Emergency Braking: Patent of Republic of Belarus No 16501 / V. V. Mikhailov, G. A. Dyko, V. N. Basalayev; No a20100550; Application dated 09.04.2010.

7. **Traction** Electric Drive in Hybrid Transport Facilities. Part 2: Design Ideology KTEO (Continuance, beginning see EC 11) [Electronic Resource]. – Access Mode: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/40498/doc/48465/>

8. **Stanislav, N.** Traction Electric Equipment Set for AC Electric Transmission Various Vehicles / N. Stanislav, S. Florentsev // *Proceedings of International Exhibition & Conference “Power Electronics, Intelligent Motion”*. Power Quality (PCIM-2009), May 4, 2009, Nuremberg, Germany. – P. 625–627.

9. **Firago, B. I.** *Electric Drive Theory: Manual* / B. I. Firago, L. B. Paliachik. – Minsk: Tekhnoperspektiva, 2004. – 527 p.

10. **Medjahed, J.** STM32 – Captain of Cortex-M3 Team / J. Medjahed, R. Popov [Electronic Resource]. – Access Mode: www.elcomdesign.ru

11. **Izosimov, D. B.** Some Peculiar Design Features Pertaining to Traction Asynchronous Motors. – Part 1 / D. B. Izosimov // *Elektrotehnika (Electric Engineering)*. – 2004. – No 12. – P. 36–45.

12. **Izosimov, D. B.** Some Peculiar Design Features Pertaining to Traction Asynchronous Motors. – Part 2 / D. B. Izosimov // *Elektrotehnika (Electric Engineering)*. – 2004. – No 12. – P. 46–51.

13. **Mikhailov, V. V.** Complex System of Debugging and Diagnostics of Algorithms Pertaining to Automatic Control Systems Using Hydro Mechanical Transmissions / V. V. Mikhailov, A. G. Snitkov // *Actual Problems of Mechanical Engineering: Collection of Research Papers*. – Minsk: Joint Institute of Mechanical Engineering NAS Belarus. – 2012. – Is. 1. – P. 316–319.

Поступила 25.03.2013