

энергетическая установка транспортного средства (варианты). Патент (изобретение) РФ №2009141549 от 27. 07. 2011г.

6. Селифонов В.В., Карпухин К.Е., Филонов А.И., Баулина Е.Е., Авруцкий Е.В. Гибридные автомобили – решение экологической проблемы автомобильного транспорта. Известия МГТУ «МАМИ», №2 (4) 2007 г.

Методика создания «интеллектуальной» системы автоматического адаптивного управления трансмиссией многоприводной колесной машины

к.т.н. проф. Лепешкин А.В.

Университет машиностроения
(495) 223-05-23, доб. 1426, lep@mami.ru

Аннотация. В статье представлены итоги научных исследований, выполненных по Государственному контракту, а также предложенная научно обоснованная методика создания «интеллектуальной» системы автоматического адаптивного управления трансмиссией многоприводной колесной машины.

Ключевые слова: многоприводные колесные машины, индивидуальный привод ведущих колес, методика разработки СААУ трансмиссии.

В данной статье приведены данные научных исследований, полученные при выполнении Государственного контракта № П1131 от 02.06.2010 на поисковые научно-исследовательские работы для государственных нужд по заданию Министерства образования и науки РФ на 2010 – 2012 г.г. в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Целью проекта являлась разработка теоретических основ проектирования системы автоматического адаптивного управления бесступенчатой трансмиссией с индивидуальным приводом ведущих колес многоосной многоприводной машины, обеспечивающей снижение потерь на ее движение и уменьшение разрушающего воздействия на почву.

В соответствии с заданием на выполнение проекта в 2010, 2011 и 2012 годы в результате научных исследований выполнено: на первом этапе «Аналитический обзор научных информационных источников по принципам построения и конструкциям известных систем автоматического адаптивного управления для регулируемых трансмиссий многоприводных колесных машин» и «Обоснование предлагаемого варианта направления исследований»; на втором этапе «Аналитический обзор используемых критериев оценки эффективности многоприводных колесных машин и разработка новых» и «Оценка эффективности применения существующих и предлагаемых критериев с точки зрения использования их при проектировании системы автоматического адаптивного управления трансмиссией многоприводной колесной машины»; на третьем этапе «Поиск закономерностей, выполнение которых обеспечивает максимальную эффективность многоприводной колесной машины с идеальной трансмиссией в различных условиях эксплуатации» и «Формулирование законов регулирования распределения мощности приводами трансмиссии между колесами машины для использования в системе автоматического адаптивного управления»; на четвертом этапе «Разработка структуры системы автоматического адаптивного управления трансмиссией многоприводной колесной машины, реализующей предложенные законы регулирования» и «Проверка эффективности использования полученных законов на многоприводной колесной машине с идеальной трансмиссией»; на пятом этапе «Определение влияния типа приводов, используемых в трансмиссии многоприводной колесной машины, и потерь энергии в них на законы регулирования распределением мощности приводами трансмиссии между колесами машины» и «Экспериментальная проверка адекватности разработанной математической модели движения многоприводной колесной машины с гидрообъемной трансмиссией»; на шестом этапе «Проверка эффективности использования предлагаемой системы автоматического адаптивного управления трансмиссией многоприводной колесной машины в общем случае ее движения» и «Обобщение и оценка результатов проведенных исследований. Формулирование

научно обоснованной методики создания систем автоматического адаптивного управления трансмиссией многоприводной колесной машины».

Полученные результаты проведенного аналитического обзора [1, 3] показали, что запланированные научные исследования в рамках настоящего проекта являются весьма перспективными и соответствуют выявленному современному международному уровню развития рассматриваемых технических систем, позволили обосновать предложенный вариант направления научных исследований в рамках данного проекта, а также подтвердить возможность достижения запланированных ожидаемых результатов исследований.

Анализ известных критериев оценки эффективности колесных машин показал, что воспользоваться ими при теоретическом обосновании методов проектирования систем автоматического адаптивного управления трансмиссиями многоприводных колесных машин и их оптимизации является весьма проблематичным. Поэтому для этой цели было предложено использовать интегральный коэффициент K_N эффективности реализации мощности двигателя самоходной машины ее трансмиссией и колесным движителем. Проведенный анализ [2, 3] показал его преимущества по сравнению с другими известными критериями.

Проведенные исследования разработанной математической модели установившегося прямолинейного движения автопоезда с активизированным прицепным звеном [3] без учета потерь в трансмиссии подтвердили известный вывод о том, что в изменяющихся условиях движения для обеспечения максимальной энергоэффективности колесной машины распределение мощности между ведущими колесами тягача и прицепа должно соответствующим образом изменяться. Использование же интегрального энергетического показателя K_N с целью выявления режимов работы рассматриваемого автопоезда, соответствующих максимальному его значению, позволило определить значения параметров, обеспечивающие оптимальное с этой точки зрения распределение мощности между ведущими колесами машины, и найти между ними графическую взаимозависимость [3].

В результате анализа данных, полученных при математическом моделировании, сформулированы законы регулирования для использования в СААУ привода ведущих колес прицепа рассматриваемого автопоезда [3], обеспечивающие работу его трансмиссии на оптимальном режиме. На их основе предложена структура [4] системы автоматического адаптивного управления трансмиссией многоприводной колесной машины, а также проведена проверка эффективности использования полученных законов на разработанной математической модели движения рассматриваемого автопоезда.

Для оценки влияния типа привода, использующегося в трансмиссии полноприводных колесных машин, на требования, предъявляемые к разрабатываемой системе автоматического адаптивного управления этих трансмиссий, были разработаны математические модели движения трехосного полноприводного автомобиля «Гидроход-49061» с ГОТ ведущих колес [5] и опытного образца четырехосного полноприводного специального шасси БАЗ-6910Э с индивидуальным регулируемым электрическим приводом ведущих колес [6], работающих в условиях недеформируемой опорной поверхности.

Анализ полученных результатов математического моделирования движения трехосного полноприводного автомобиля «Гидроход-49061» с ГОТ ведущих колес в условиях недеформируемой опорной поверхности и его испытаний показал:

- 3) разработанная математическая модель достаточно хорошо отражает процессы, сопровождающие движение рассматриваемого автомобиля по недеформируемому основанию;
- 4) разработанная математическая модель позволяет оценивать эффективность реализации мощности, снимаемой с вала двигателя, для движения рассматриваемого автомобиля, а также эффективность работы ГОТ автомобиля и каждого входящего в нее гидропривода;
- 5) благодаря этому разработанная модель может быть использована для проведения исследований, посвященных разработке элементов теории распределения мощности в гидрообъемной трансмиссии для системы управления полноприводным ав-

томобилем «Гидроход-49061», обеспечивающей максимальные тягово-энергетические показатели машины;

- б) сравнение результатов математического моделирования с данными проведенных экспериментальных исследований, а также проведенная оценка относительных среднеквадратических отклонений контролируемых величин подтверждают адекватность разработанной математической модели в рассматриваемых дорожных условиях.

Анализ полученных результатов математического моделирования опытного образца четырехосного полноприводного специального шасси БАЗ-6910Э с индивидуальным регулируемым электрическим приводом ведущих колес в условиях недеформируемой опорной поверхности показал:

- 1) разработанная математическая модель достаточно хорошо отражает процессы, сопровождающие движение рассматриваемого автомобиля по недеформируемому основанию;
- 2) существующая система управления электротрансмиссией в случае небольших различий по условию работы ведущих колес автомобиля практически не требует корректировки;
- 3) в случае, когда движение исследуемого автомобиля характеризуется существенным различием условий работы ведущих колес, желательно в системе управления ЭТ предусмотреть корректирующую цепь, обеспечивающую блокировку возможности раскручивания ведущего колеса, работающего в условиях плохого сцепления с опорной поверхностью;
- 4) полученные результаты математического моделирования хорошо согласуются с данными проведенных экспериментальных исследований опытного образца четырехосного полноприводного специального шасси БАЗ-6910Э.

Проведенные исследования разработанных математических моделей, а также результаты проведенных экспериментальных исследований указанных полноприводных автомобилей доказали адекватность этих математических моделей [7]. На основании этого был сделан вывод о том, что эти математические модели могут быть рекомендованы для использования при проведении дальнейших исследований с целью получения корректирующих алгоритмов для систем автоматического адаптивного управления трансмиссиями рассматриваемых автомобилей.

Одним из результатов исследований является вывод о том, что при движении исследуемого автомобиля «Гидроход-49061» с ГОТ ведущих колес по недеформируемому основанию возникновение различий в условиях работы трех гидроприводов, входящих в ГОТ, приводит к циркуляции мощности в трансмиссии, что естественно ухудшает тягово-энергетические показатели автомобиля. Причем причиной возникновения этих различий может быть как погрешность системы управления ГОТ, так и изменения условий качения ведущих колес соответствующих осей автомобиля.

Для компенсации возникающих рассогласований предложено в САУ ГОТ включить корректирующие цепи [8], которые следует рассматривать как систему адаптации ГОТ к условиям движения автомобиля. Эти корректирующие цепи в процессе движения машины должны обеспечивать необходимое изменение параметров регулирования рабочих объемов насосов и гидромоторов, используя для этой цели данные по следующим двум контролируемым величинам: перепаду давления на основном насосе i -го гидропривода и угловой скорости вращения j -го ведущего колеса i -ой оси автомобиля.

Анализ проведенных исследований разработанной математической модели движения трехосного полноприводного автомобиля «Гидроход-49061» с ГОТ ведущих колес в условиях недеформируемой опорной поверхности, дополненной уравнениями, характеризующими работу САУ трансмиссии, указывает на то, что при работе предложенных корректирующих цепей системы управления ГОТ [8] в моделируемом случае продольная скорость движения автомобиля, а соответственно, и полезная мощность, необходимая для его движения, прак-

тически не изменялись, тогда как потребляемая ГОТ от двигателя мощность уменьшилась. Обусловлено это тем, что в результате выполненной коррекции была практически ликвидирована имевшаяся в трансмиссии циркуляция мощности, снизились значения передаваемых в ней нагрузок, а значит, уменьшились потери.

В итоге после коррекции:

- потребляемая ГОТ от двигателя мощность уменьшилась с 29,1 кВт до 27,2 кВт, снижение составляет около 2 кВт или на ~ 7 %;
- расчетное увеличение показателя эффективности автомобиля составило ~3,4 %.

Таким образом, упомянутые выше корректирующие алгоритмы, предлагаемые для использования в СААУ ГОТ, позволят в процессе движения рассматриваемого автомобиля компенсировать возникающую в его трансмиссии циркуляцию мощности, а значит, улучшить тягово-энергетические показатели рассматриваемого автомобиля, снизить нагрузки в трансмиссии и, следовательно, увеличить срок службы ее агрегатов.

Анализ проведенных исследований математической модели опытного образца четырехосного полноприводного специального шасси БАЗ-6910Э с индивидуальным регулируемым электрическим приводом ведущих колес в условиях недеформируемой опорной поверхности, дополненной уравнениями, характеризующими работу СААУ электрической трансмиссии предлагаемой конструкции, показал эффективность такой СААУ. Результатом использования модернизированного закона регулирования СААУ при переезде рассматриваемым автомобилем синусоидального препятствия является не только уменьшение степени снижения величины продольной скорости автомобиля по сравнению с тем, что получалось без использования системы стабилизации, но и существенное уменьшение раскрутки ведущих колес автомобиля в моменты их отрыва от опорной поверхности. Очевидно, что при этом в меньшей степени будут сказываться и связанные с ними негативные явления, а именно: непроизводительные затраты энергии, реализуемой через ЭТ для движения автомобиля, и повышенный износ шин, обусловленный повышенным буксованием раскрученного ведущего колеса, возникающим в момент его контакта с опорной поверхностью.

Таким образом, предложенный закон регулирования СААУ [9] позволяет решить задачу повышения эффективности работы рассматриваемого автомобиля с ЭТ индивидуального привода его ведущих колес в условиях переезда им через единичное синусоидальное препятствие, а также в других подобных случаях эксплуатации.

На основании полученных результатов исследований предложен способ автоматического адаптивного управления бесступенчатой трансмиссией многоприводного транспортного средства [10], разработаны устройство автоматического адаптивного управления бесступенчатой гидрообъемной трансмиссией многоприводного колесного транспортного средства [11] и устройство автоматического адаптивного управления бесступенчатой электрической трансмиссией многоприводного колесного транспортного средства [12], на которые получены соответствующие патенты РФ.

Анализ работы ведущих колес многоприводной колесной машины, оснащенной предлагаемой «интеллектуальной» СААУ, позволил сделать вывод о существенном снижении разрушающего воздействия на грунт такой машины [13].

Результаты проведенных научных исследований разработанных математических моделей движения многоприводных колесных машин с бесступенчато-регулируемыми трансмиссиями их ведущих колес позволяют сформулировать научно обоснованную методику создания для таких трансмиссий «интеллектуальной» системы автоматического адаптивного управления. Эта методика по нашему мнению должна включать в себя следующие работы, последовательно выполняемые еще на этапе проектирования подобных транспортных средств повышенной проходимости.

1-й этап. Разработка математической модели движения проектируемой многоприводной колесной машины.

Эту математическую модель рекомендуется вначале создать для анализа движения рассматриваемой машины в условиях недеформируемой опорной поверхности. Обусловлено это

тем, что математическое описание взаимодействия эластичного колеса с недеформируемой опорной поверхностью в настоящее время более надежно, дает стабильные результаты и достаточно точно позволяет оценить потери энергии, возникающие при этом.

Исключение из рассмотрения более сложно описываемых процессов, сопровождающих качение эластичных колес по деформируемой опорной поверхности, позволяет при формулировании законов регулирования для разрабатываемой СААУ сосредоточиться на том, чтобы эти законы при управлении трансмиссией прежде всего компенсировали потребности согласования работы приводов каждого из ведущих колес машины, обусловленные как изменяющимися условиями работы ведущих колес машины, так и возможными погрешностями в работе проектируемой СААУ.

Кроме этого такой подход также позволяет оптимизировать работу трансмиссии рассматриваемой машины с точки зрения обеспечения минимума потерь на передачу энергии трансмиссией. Исходя из этого при разработке указанной математической модели следует использовать описания работы трансмиссии, позволяющие с достаточной степенью точности оценивать возникающие в ней потери на разных режимах работы.

Существенное значение при разработке математической модели проектируемого транспортного средства в ракурсе решения рассматриваемой задачи также имеет используемое описание работы источника механической энергии. С нашей точки зрения, на начальном этапе рассматриваемых работ можно ограничиться описанием внешней характеристики используемого устройства. На последующих этапах следует ожидать потребность в качественном описании и так называемых частичных его характеристик, а также характеристики минимального потребления топлива.

В качестве ориентира при разработке указанной математической модели проектируемого транспортного средства могут рассматриваться наработки, полученные в рамках выполнения настоящего проекта [3, 5, 6 и др.].

2-й этап. Исследование разработанной математической модели с целью формулирования законов регулирования трансмиссией проектируемого транспортного средства для их использования в разрабатываемой СААУ.

Вначале эти исследования следует выполнить для прямолинейного движения машины как при установившемся движении, так и при разгоне.

При моделировании рекомендуется выбирать различные условия движения машины от самых легких (ровная горизонтальная дорога) до максимально тяжелых (движение на подъем и т.п.).

Из всего многообразия получающихся вариантов движений машины в данных условиях выбирается оптимальный режим ее работы с точки зрения обеспечения максимальной энергоэффективности. В качестве критерия для оценки энергоэффективности машины рекомендуется использовать предложенный в работе [3] коэффициент эффективности преобразования потребляемой энергии трансмиссией машины и ее двигателем в работу по ее движению.

Выявленные взаимозависимости параметров, характеризующих движение проектируемой машины на оптимальных режимах, используются при формулировании законов регулирования СААУ. Для этой цели рекомендуется использовать методику [3], разработанную при выполнении данного проекта.

3-й этап. Проверка эффективности сформулированных законов регулирования трансмиссией проектируемой машины на разработанной математической модели в разных эксплуатационных режимах.

На этой стадии рекомендуется использовать математические модели, позволяющие проверить эффективность СААУ как при прямолинейном движении проектируемой машины по недеформируемой опорной поверхности, так и при ее движении по криволинейной траектории, а также при переезде машины через различные неровности на дороге и при ее движении в условиях деформируемой опорной поверхности.

Выявленные при этом недочеты в работе СААУ предлагается компенсировать путем включения специальных корректирующих алгоритмов, эффективность которых проверяется

путем повторного моделирования соответствующего режима движения проектируемой машины.

Кроме стремления к максимальной энергоэффективности машины, одним из главных критериев при этом следует признать способность создаваемой СААУ компенсировать возможную циркуляцию мощности в трансмиссии, вызванную разными факторами сопровождающими эксплуатацию проектируемой многоприводной машины.

4-й этап. Экспериментальная проверка полученных в результате математического моделирования законов регулирования.

Для этой цели должен использоваться специально созданный опытный образец проектируемого транспортного средства, снабженный СААУ, обладающей расширенными возможностями в плане подбора различных вариантов значений коэффициентов обратных связей, коэффициентов чувствительности и зон нечувствительности каналов управления.

При этом обязательным следует признать необходимость проведения эксперимента, позволяющего оценить адекватность разработанной математической модели проектируемой машины. Если при этом выявлена существенная ее погрешность, то после соответствующей ее коррекции следует проверить справедливость данных, полученных на 2-м и 3-м этапах работы.

5-й этап. Проведение ресурсных испытаний.

Этот этап рекомендуется проводить с целью определения корректирующего алгоритма, призванного компенсировать влияние износа элементов трансмиссии транспортного средства на сформулированный закон регулирования, использующийся в разрабатываемой СААУ.

Необходимость таких исследований обусловлена тем, что наличие такого алгоритма позволит существенно продлить эффективную работу регулируемой трансмиссии на проектируемом транспортном средстве, а значит, повысит его окупаемость в процессе эксплуатации.

Для этого в течение ресурсных испытаний накапливаются сведения об изменении характеристик элементов трансмиссии транспортного средства в процессе его эксплуатации и оценивается влияние этих изменений на выявленные ранее взаимозависимости рабочих параметров, соответствующих оптимальным режимам работы проектируемой машины. Эту оценку, в частности, рекомендуется проводить с использованием разработанной математической модели проектируемого транспортного средства по предлагаемой методике после коррекции этой модели, добиваясь ее адекватности характеристикам машины на рассматриваемом этапе жизненного цикла.

Очевидно, что для обеспечения реализации в СААУ такой коррекции законов регулирования трансмиссией проектируемой машины должна быть разработана специальная система диагностических тестов, на основании результатов которых и проводится указанная коррекция.

Создаваемая по этой методике СААУ, в соответствии с результатами проведенных исследований, должна способствовать улучшению тягово-энергетических показателей многоприводных колесных машин повышенной проходимости при их движении как в условиях бездорожья, так и в условиях современных дорог, имеющих качественные покрытия.

Выводы

Таким образом, научные исследования, проведенные при выполнении данного проекта, позволили теоретически обосновать предложенную методику создания «интеллектуальной» СААУ регулируемых трансмиссий с индивидуальным приводом ведущих колес, обеспечивающую снижение потерь на движение многоприводной колесной машины и уменьшение разрушающего воздействия на почву ее колесных движителей.

Литература

1. Лепёшкин А.В. Опыт использования и перспективы создания многоприводных колесных машин повышенной проходимости. М., МАМИ. Журнал «Известия МГТУ «МАМИ»», № 2 (10), 2010. с. 54-66.
2. Лепешкин А.В. Критерии оценки энергоэффективности многоприводных колесных ма-

- шин. - М., «Автомобильная промышленность», 2010, № 10, с. 19-23.
3. Лепешкин А.В. Методика разработки СААУ трансмиссий многоприводных колесных машин. Монография. Издательство «LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG» (Германия). 2011. 102 с. ISBN 978-3-8454-3161-1.
 4. Лепешкин А.В. Структура системы автоматического адаптивного управления бесступенчатой трансмиссией многоприводного транспортного средства. М., МАМИ. Научный рецензируемый журнал Известия МГТУ «МАМИ», № 1 (11), 2011. с. 51-59.
 5. Лепешкин А.В. Математическая модель движения автомобиля «Гидроход-49061» с гидрообъемной трансмиссией в условиях недеформируемой опорной поверхности. Свидетельство о регистрации электронного ресурса ОФАП № 16157 от 06.09.2010.М., ВНИИЦ, 2010, № 50201001473.
 6. Лепешкин А.В. Математическая модель движения опытного образца четырехосного полноприводного специального шасси БАЗ-6910Э с индивидуальным регулируемым электрическим приводом ведущих колес в условиях недеформируемой опорной поверхности. Свидетельство о регистрации электронного ресурса ОФАП № 18459 от 17.07.2012. М., ВНИИЦ, 2012, № 50201251014.
 7. Курмаев Р.Х., Лепешкин А.В. Повышение точности математической модели движения колесной машины на основании использования результатов ее испытаний. Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. – М., МГТУ «МАМИ», № 1 (7), 2009, с. 46-56.
 8. Бахмутов С.В., Шухман С.Б., Лепешкин А.В., Курмаев Р.Х. Корректирующие алгоритмы для системы управления гидрообъемной трансмиссией полноприводного АТС при прямолинейном его движении. Журнал «Автомобильная промышленность», 2010, № 1, с. 14-18.
 9. Кулаков Н.А., Лепешкин А.В., Черанёв С.В. Теоретическое обоснование требований к системе автоматического адаптивного управления электротрансмиссией полноприводного четырехосного автомобиля с индивидуальным приводом ведущих колес. Журнал Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. – М., МГТУ «МАМИ», № 1(13), 2012. с. 65-71.
 10. Патент РФ на изобретение № 2397893 от 27.08.2010. Способ автоматического адаптивного управления бесступенчатой трансмиссией многоприводного транспортного средства. Авт.: С.В. Бахмутов, А.В. Лепешкин, С.Б. Шухман.
 11. Патент РФ на изобретение № 2398149 от 27.08.2010. Устройство автоматического адаптивного управления бесступенчатой гидрообъемной трансмиссией многоприводного колесного транспортного средства. Авт.: С.В. Бахмутов, А.В. Лепешкин, С.Б. Шухман., Курмаев Р.Х.
 12. Патент РФ на изобретение № 2397088 от 20.08.2010. Устройство автоматического адаптивного управления бесступенчатой электрической трансмиссией многоприводного колесного транспортного средства. Авт.: С.В. Бахмутов, А.В. Лепешкин, Н.А. Кулаков.
 13. Курмаев Р.Х., Малкин М.А. Улучшение энергетических и экологических показателей полноприводных автомобилей с гидрообъемной трансмиссией за счет оптимального построения электронной системы управления. Научный рецензируемый журнал Известия МГТУ «МАМИ». – М., МГТУ «МАМИ», № 2 (6), 2008. с. 51-56.

Сравнительный анализ последовательного и комбинированного вариантов регулирования гидрообъемной трансмиссии полноприводной колесной машины

к.т.н. проф. Лепешкин А.В.
Университет машиностроения
(495) 223-05-23, доб. 1426, lep@mami.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследований разработанной математической модели прямолинейного движения полноприводного трехосного