

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ

УДК 62-235

Л.Г. КРАСНЕВСКИЙ, чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.

главный научный сотрудник

E-mail: krasnevski_l@tut.by

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 17.08.2017.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК: ПОТЕНЦИАЛ АВТОМАТИЧЕСКИХ ТРАНСМИССИЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ НОВЫХ МЕЖДУНАРОДНЫХ ТРЕБОВАНИЙ

Проведен анализ новых требований экологических стандартов на 2017–2025 гг. с позиций использования технических возможностей современных автоматических трансмиссий (АТ), в том числе гибридных, для повышения топливной экономичности силовых установок мобильных машин. Показано, что здесь высокий потенциал основных типов АТ связан в первую очередь с возможностью обеспечения работы теплового двигателя вблизи зоны минимального расхода топлива — тем ближе, чем больше механических ступеней у АТ. Современный уровень — 9–10 у легковых и 10–14 у тяжелых гидромеханических и механических АТ, что приближает их к гибридным по величине эффекта. Кроме того, имеются резервы повышения КПД самих АТ путем снижения их внутренних потерь.

Ключевые слова: энергоэффективность силовых установок, мобильные машины, автоматические трансмиссии, гибридные силовые установки

Введение. Как известно, загрязнение атмосферы земли в значительной степени вызвано токсичными выбросами двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Содержащиеся в них парниковые газы вызывают потепление климата, а рост концентрации закиси азота способствует разрушению озонового слоя, защищающего Землю от ультрафиолетового излучения.

Особую актуальность этой проблеме, очевидно, придает информация, опубликованная в отчете Всемирной метеорологической организации — специализированного межправительственного учреждения ООН [1]. Как следует из отчета, концентрация углекислого газа в атмосфере Земли достигла самого высокого за последние 800 тысяч лет уровня, что на 45 % превышает ее в доиндустриальный период (1750 год). Темпы роста за последние 70 лет почти в 100 раз превысили темпы конца последнего ледникового периода, которые никогда ранее не наблюдались. Эксперты ООН предупреждают, что без быстрых сокращений выбросов углекислого газа и других парниковых

газов к концу этого столетия нас ожидает опасное повышение температуры, значительно превышающее целевой показатель, установленный Парижским соглашением об изменении климата. Фатальность этого процесса обусловлена тем, что человечество не располагает эффективными средствами для восстановления атмосферы, а может лишь уменьшать свое воздействие на нее.

На рисунке 1 показана диаграмма из доклада об итогах мирового производства и продаж автомобилей, представленного в рамках информационных программ Женевского автосалона 2 марта 2016 г. [2]. Первый ясный вывод, который можно сделать о мировых итогах за 2005–2015 гг., заключается в том, что автомобильная промышленность в глобальном масштабе продолжает успешно развиваться. В 2015 году было произведено около 90,6 млн автомобилей, почти на 1 % больше, чем в 2014 году, и более 89 млн автомобилей было продано, с ростом на 1,4 % по сравнению с 2014 годом. Из диаграммы также видно, что кризис 2008–2009 гг. был непродолжительным,

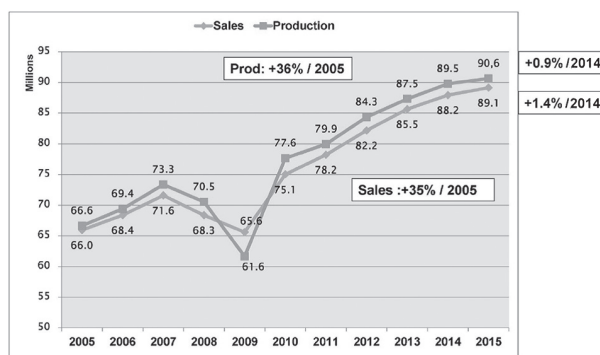


Рисунок 1 — Мировое производство и продажа автомобилей в 2005–2015 гг. (кроме полицейских, военных, административных) [2]

и общий тренд с 2005 года является исключительно позитивным — темп роста продаж за 10 лет возрос на 35 %.

Дополнительно на рисунке 2 показана динамика производства автомобилей за период 2000–2014 гг. в первой десятке стран-производителей [3]. Здесь поражает почти трехкратный рост производства автомобилей в Китае за последние десять лет.

Показанные выше цифры мирового производства позволяют представить, какое гигантское количество загрязнений выбрасывается в атмосферу с учетом того, что КПД теплового ДВС (т. е. использования химической энергии сгорающего топлива) не превышает 30 %.

В числе мероприятий по охране окружающей среды, принимаемых мировым сообществом в области транспорта, — все более жесткие международные стандарты по снижению расхода топлива и вредных выбросов.

Цель данной работы — показать потенциал автоматических трансмиссий (АТ) в выполнении нарастающих требований повышения топливной экономичности (который, судя по результатам многочисленных специальных исследований авторитетных зарубежных организаций, неожиданно оказался весьма значительным), а в конечном счете дополнительно попытаться оценить то влияние, которое новые экологические стандарты ока-

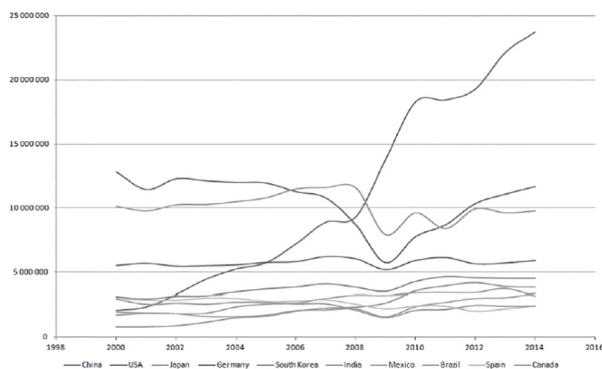


Рисунок 2 — Топ-10 стран-автопроизводителей за 1998–2014 гг., тыс. шт. (2014 г.: первое место — Китай, второе — США, третье — Япония) [3]

жут на конкурентоспособность всех стран-участников мирового автомобильного рынка.

О пакете новых стандартов по топливной экономичности и эмиссии парниковых газов. В 2012 году Национальное управление безопасности движения на скоростных дорогах Департамента автомобильных перевозок США (US Department of Transportation's National Highway Traffic Safety Administration — NHTSA) совместно с Агентством по охране окружающей среды (US Environmental Protection Agency — EPA) разработали пакет стандартов CAFE (Corporate Average Fuel Economy and greenhouse gas (GHG) emission standards) на средний уровень топливной экономичности и эмиссии парниковых газов легковых и легких грузовых автомобилей (EPA/NHTSA 2012) [4]. Они вошли в Национальную программу США и распространяются на такие автомобили 2017–2025 модельных лет. Для них устанавливаются требования по увеличению пробега на одном галлоне бензина с 35,4 миль в 2010–2016 гг. до 54,5 миль в 2017–2025 гг., т. е. почти на 50 %. Для достижения таких показателей необходимо ежегодно уменьшать расход топлива легковым автомобилем примерно на 4,2 %, а легким грузовым — на 3 %.

На рисунке 3 приведены 9 кривых, устанавливающих целевые требования CAFE к топливной экономичности на каждый из 9 лет (2017–2025 гг.) в зависимости от универсального показателя — площади отпечатка автомобиля на дороге (произведения базы на колею — см. слева на рисунке 3). Верхняя и нижняя кривые в пучке соответствуют 2025 и 2017 годам. В таблице, кроме показателей пробега, приведены предельные уровни выбросов углекислого газа для легковых автомобилей и легких грузовых автомобилей в сравнении с уровнями стандартов 2010–2016 годов.

Как сказал 44-й президент США Барак Обама, эти стандарты представляют собой самый важный шаг из всех, которые были ими сделаны для уменьшения зависимости от иностранной нефти, и уже к середине следующего десятилетия автомобили выйдут на уровень около 55 миль/галлон — почти вдвое больше, чем в 2012 году. Это, по его словам, укрепит национальную безопасность [5].

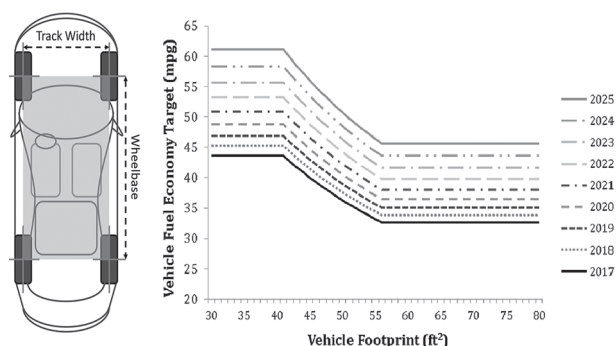


Рисунок 3 — Требования стандартов CAFE 2017–2025 к топливной экономичности легковых автомобилей [4]

Таблица — Расчетный требуемый уровень экономичности в соответствии с Национальной программой США [4]

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Passenger Car														
CAFE (mpg)	33,3	34,2	34,9	36,2	38,7	40,1	41,6	43,1	44,8	46,8	49,0	51,2	53,6	56,2
EPA (g CO ₂ /mi)	263	256	247	236	225	212	202	191	182	172	164	157	150	143
Light Truck														
CAFE (mpg)	25,4	26,0	26,6	27,5	29,2	29,4	30,0	30,6	31,2	33,3	34,9	36,6	38,5	40,3
EPA (g CO ₂ /mi)	346	337	326	312	298	295	285	277	269	249	237	225	214	203

Примечание: CAFE в милях на галлон, CO₂ в граммах на милю в соответствии с EPA's GHG

При обсуждении данных стандартов высказывалось мнение, что такое снижение расхода топлива потребует создания к 2025 году совершенно нового парка автомобилей, причем более дорогих — до 5 000 у. е. дополнительно. А это оставит без новых автомобилей 7 млн американцев. Но все же в июле 2011 года 13 производителей, которые выпускают более 90 % продаваемых на американском рынке автомобилей, согласились с новыми требованиями CAFE. В их числе Ford, General Motors, Chrysler, BMW, Toyota.

Также отмечается, что есть ряд других документов, которые окажут влияние на распространение новых технологий экономии топлива. Среди них — программа применения автомобилей с нулевым выхлопом — электромобилей на батареях, на топливных элементах, подзаряжаемых гибридов — в Калифорнии до 15,4 % уже с 2017 года, а в десяти других присоединившихся штатах — с 2025 года.

На рисунке 4 дано сопоставление уровня известных моделей автомобилей, выпускаемых сегодня, с новыми требованиями. Здесь показатели топливной экономичности группы сертифицированных автомобилей 2012 и 2013 модельных лет нанесены на график целевых показателей CAFE. Как видно, лучшие из них уже сегодня удовлетворяют требованиям 2022–2024 гг., а два

гибрида — Toyota Prius и Ford Fusion — превосходят уровень 2025 года.

Также весьма показателен рисунок 5, иллюстрирующий изменение ситуации в мире с выбросами NO_x в течение 2011–2015 гг. Пучком горизонтальных прямых внизу графика обозначены допустимые уровни NO_x (верхняя — по Евро-5, нижняя — по Евро-6), светлыми значками обозначены показатели множества конкретных автомобилей уровня Евро-5, а темными — Евро-6. Видно, насколько велико число машин с высокими выбросами. Но к 2015 году оно резко снижается в сторону уровня Евро-6, что свидетельствует об эффективности экологических стандартов [6].

Ввиду остроты экологической ситуации в мире широким фронтом проводятся исследования путей повышения топливной экономичности мобильных машин и повышения их экологичности.

Потенциал автоматических трансмиссий. В работе [4], опубликованной в 2015 году, подробно рассматриваются стандарты CAFE, а также всесторонне исследуются возможные пути повышения топливной экономичности по основным агрегатам и системам автомобиля. В числе наиболее эффективных — применение автоматических трансмиссий (АТ).

В связи с этим следует отметить, что общепризнанным радикальным решением проблемы снижения потребления топлива являются силовые установки на водородных топливных элементах (ТЭ). КПД процесса получения энергии в ТЭ составляет 50 % — вдвое выше, чем при сгорании

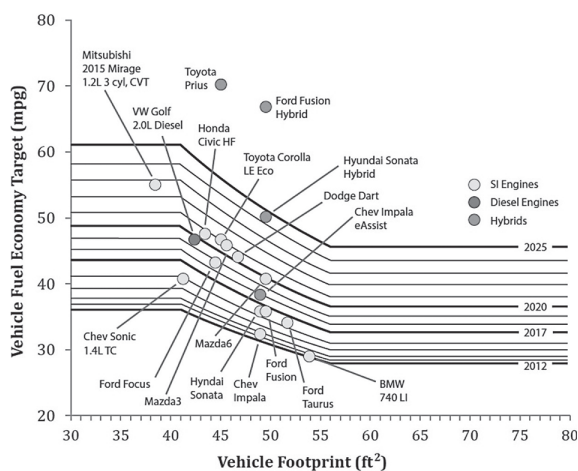


Рисунок 4 — График целевых показателей топливной экономичности по стандартам CAFE с нанесенными показателями группы отобранных сертифицированных автомобилей 2012 и 2013 модельных лет [4]

Euro 6 Technology Already Improving Real World NO_x

A third of Euro 6b diesel (and all Euro 6 gasoline) cars tested met 2.1x NO_x CF

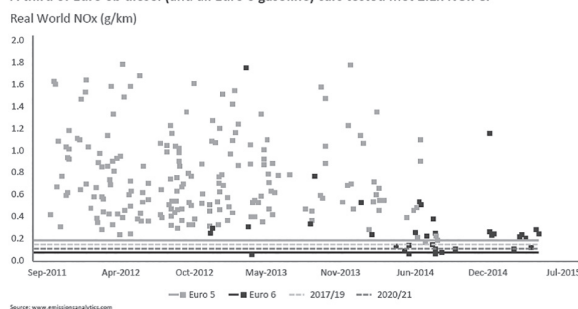


Рисунок 5 — Как технология Евро 6 улучшает ситуацию в мире с выбросами NO_x [6]

топлива в ДВС. Для применения ТЭ также необходимы специализированные АТ, включающие электропривод, который дополнительно дает возможность рекуперации кинетической энергии автомобиля при торможении. Совместное использование трех этих новых технологий (ТЭ, тяговый электропривод, рекуперация) позволяет повысить в таких комбинированных силовых установках КПД использования химической энергии топлива до 75 %. Однако для их массового применения необходимо создание глобальной инфраструктуры производства, хранения и доставки водорода.

Таким образом, можно утверждать, что роль АТ в повышении энергоэффективности силовых установок сегодня сопоставима с ролью самих ДВС. Поскольку наряду с повышением КПД трансмиссии, именно с ее помощью обеспечивается возможность работы ДВС с минимальным мгновенным и интегральным расходом топлива. Также известно, что только автоматическое управление силовым агрегатом — как двигателем, так и трансмиссией, особенно в гибридных силовых установках (ГСУ), — способно в полной мере реализовать эту возможность.

Эффект применения АТ по сравнению с классической механической трансмиссией с ручным управлением (МТ) можно оценить с помощью графика (рисунок 6), где показано статистическое распределение числа водителей (ось ординат) от достигаемого ими уровня расхода топлива (ось абсцисс) в двух группах автомобилей с МТ и с АТ ZF-AS Tronic. Как видно, показатели с МТ имеют значительно большее рассеяние, чем с АТ, и значительно большая их часть попала в зону высоких расходов топлива. В результате расход топлива по сравнению с МТ — 95–97 % [7].

Самый совершенный и массовый тип АТ в настоящее время — планетарные гидромеханические трансмиссии, применение которых на легковых автомобилях США и Японии достигло 90 %. Именно они могут служить убедительным примером влияния АТ на энергоэффективность силовой установки. До энергетического кризиса 80-х годов

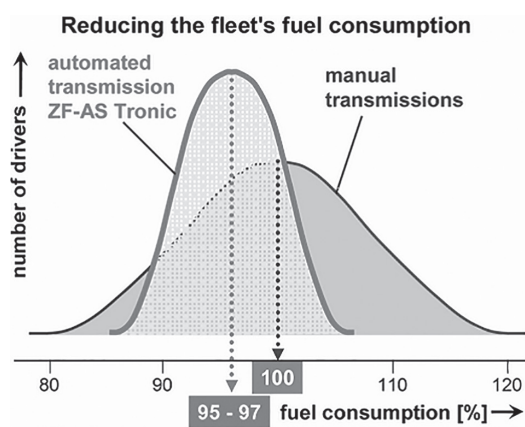


Рисунок 6 — Снижение расхода топлива парком автомобилей при использовании автоматических трансмиссий [7]

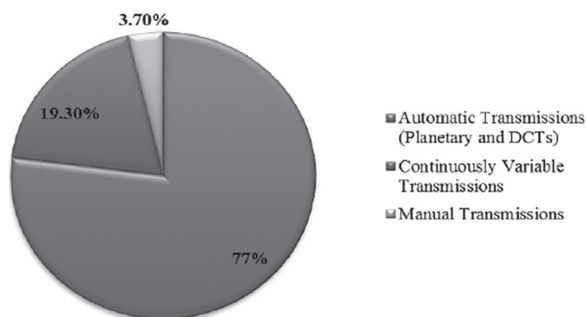


Рисунок 7 — Европейский рынок трансмиссий, 2014 год [4]

прошлого века легковые американские «семейные» автомобили, имея трех-четырёхступенчатые АТ с неблокируемым гидротрансформатором, расходовали много бензина, который тогда был дешев. Правительством США была поставлена задача — создать автомобиль с расходом не более 8,5 л/100 км, что в то время было фантастикой.

После кризиса в конструкции этих АТ был внесен ряд кардинальных усовершенствований для повышения КПД. Так, была введена автоматическая блокировка гидротрансформатора (при этом в АТ был введен демпфер крутильных колебаний крутящего момента ДВС как в сухих сцеплениях МТ). Число ступеней постепенно увеличилось с трех-четырех до пяти-шести. Одну-две высшие ступени впервые стали выполнять ускоряющими (с передаточными числами меньше единицы), что само по себе оказалось весьма результативным. А в последние годы компании Mercedes (Zahnrad Fabrik), Toyota, General Motors перешли на восьмиступенчатые, затем на девятиступенчатые АТ (и, конечно, с блокируемым гидротрансформатором). Уже в 2014 году на европейском рынке трансмиссий МТ занимали лишь 3,7 %, а остальное — АТ (77 % — планетарные и механические с двумя сцеплениями (ДСТ), 19 % — бесступенчатые; рисунок 7, [4]).

Все эти меры дали значительный эффект, представление о котором дает опубликованная

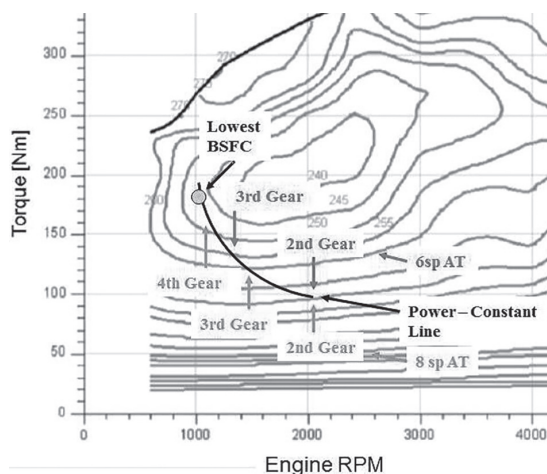


Рисунок 8 — Сравнение топливной экономичности шести- и восьмиступенчатых АТ [4]

компанией Zahnrad Fabrik показательная информация о динамике снижения расхода топлива при последовательном увеличении числа ступеней выпускаемых ею семейств АТ. Постепенный переход от трехступенчатых к четырехступенчатым АТ дал экономию 6 %, далее к пятиступенчатым — еще 2 %, к шестиступенчатым первого поколения — 5 %, к шестиступенчатым второго поколения — 3 %, и, наконец, к восьмиступенчатым — еще 6 %. Итого 22 %. А применение в восьмиступенчатых АТ режима «старт-стоп» (остановка ДВС при кратковременных стоянках и последующий автоматический запуск при трогании) дало дополнительно 5 %, увеличивая суммарную экономию до 27 % — примерно такую же, как ГСУ. В результате по расходу топлива эти АТ уже мало уступают механическим, что полностью компенсируется радикальным облегчением управления и сокращением сроков обучения, а также рядом других преимуществ.

Эффект от увеличения числа ступеней показан на рисунке 8 применительно к двум АТ — типичной шестиступенчатой (рисунок 9, [4]) и восьмиступенчатой ZF 8HP45 (рисунок 10, [4]). Здесь на топографическую характеристику ДВС нанесена гипербола постоянной мощности, проведенная через точку минимального удельного расхода топлива. Две стрелки сверху над гиперболой указывают на зоны работы второй и третьей ступеней шестиступенчатой АТ (очевидно, при разгоне с места), а три нижних стрелки — зоны второй, третьей и четвертой у восьмиступенчатой. Видно, что последняя значительно ближе к точке минимального расхода.

Следует отметить, что в последние годы тенденция существенного увеличения числа ступеней охватила и АТ для тяжелых грузовых и специальных автомобилей. В этой связи особый интерес представляет новая модель АТ TC10 компании Allison для тяжелых грузовых автомобилей мощностью до 600 л. с., работающих в условиях как городских, так и междугородних перевозок. О начале ее производства компания объявила в 2013 году [8, 9]. АТ выполнена по вальвно-планетарной схе-

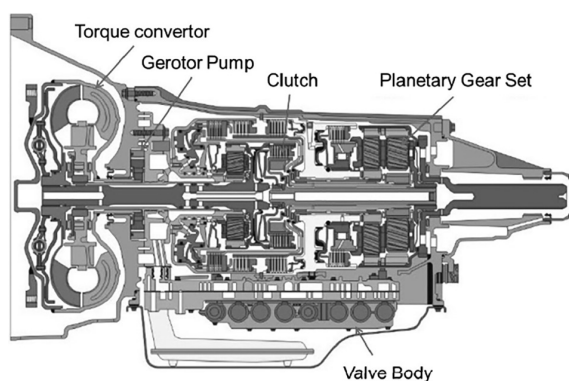


Рисунок 9 — Типичная шестиступенчатая планетарная АТ [4]

ме с двумя промежуточными валами, имеет 10 ступеней переднего и две заднего хода. Подчеркивается, что, по данным длительной эксплуатации опытных партий, она дает экономию 5 % топлива по сравнению с обычными МТ и с автоматизированными (АМТ), т. е. превосходит чисто механические по экономичности [10]. На ней установлена интеллектуальная мехатронная система автоматического управления (МСУ) Allison пятого поколения. Она, как отмечается, обеспечивает исключительно высокое качество переключений всех 10 ступеней. Гарантия на модель TC10 пять лет или пробег 750 000 миль.

Allison одновременно рекламирует другую новую разработку — управляющий программно-аппаратный комплекс FuelSense (в оригинале — «FuelSense Package») для АТ. Он дает экономию топлива до 20 % по сравнению с МСУ Allison четвертого поколения [11]. К его особенностям, в частности, относятся управление скоростью ДВС (в том числе при переключениях ступеней) и ускорением при разгоне. Эти технологии уже включены в МСУ пятого поколения на АТ TC10. FuelSense также может устанавливаться на некоторые модели АТ Аллисон прежних выпусков.

Неотъемлемый компонент таких АТ — гидравлическая система охлаждения, которая создает соответствующие затраты мощности. Для их исключения за последние десять лет расширяется применение на легковых и легких грузовых автомобилях АТ, не имеющих автономных систем охлаждения. Это АМТ и ДСТ (преселекторные).

АМТ имеют самый высокий КПД (до 95–97 %), что привело в последние годы к значительному увеличению их производства. Но присущий им разрыв потока мощности при переключениях ступеней отрицательно сказывается на тяговых свойствах и ограничивает применение АМТ на машинах с тяжелыми условиями эксплуатации.

ДСТ имеют два входных вала (как правило, концентричных), на которых установлены два «сухих» сцепления (или два «мокрых» многодисковых фрикциона), что позволяет организовать переключения ступеней без разрыва потока мощности. Таким образом, они лишены указанного выше недостатка АМТ, но при этом, не имея ги-

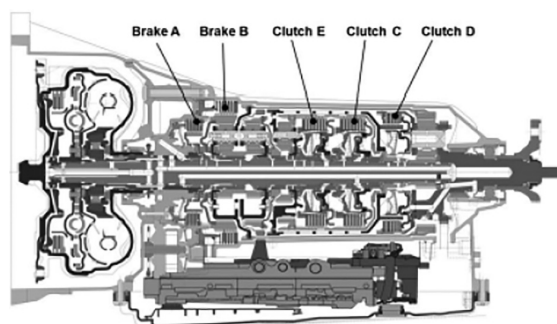


Рисунок 10 — Восьмиступенчатая автоматическая трансмиссия ZF 8HP45 [4]

дросистемы в «сухом» исполнении, по сравнению с ГМП сохраняют достаточно высокий КПД. Это привело в последние два-три года к значительному росту производства ДСТ с выходом их как на легковые, так и на развозные и легкие грузовые автомобили. Прогнозируется дальнейшее быстрое расширение их применения в ближайшие годы, особенно в Европе и в Китае.

Особое место занимают трансмиссии нового типа — гибридные электромеханические (ГЭМТ), которые дают экономию топлива до 30 %. В общем случае ГЭМТ представляет собой помещенные в общий картер одну-две обратимые электрические машины (мотор-генераторы — МГ) и дифференциальный планетарный механизм или планетарную или вальную АТ, образующие гибридную многопоточную многорежимную непрерывно-ступенчатую трансмиссию. При наличии АТ, переключая ее ступени, изменяют передаточные числа между МГ и входным или выходным валами ГЭМТ, что позволяет выводить ДВС и МГ на экономичные режимы. Помимо режима чисто электрического привода (на малых скоростях), возможно несколько режимов совместной или одиночной работы ДВС и ГЭМТ, а также, при неисправности электропривода, несколько дублирующих чисто механических ступеней.

В [12] представлены результаты исследования характеристик ГЭМТ автомобиля Toyota Prius третьего поколения модели 2010 года, выполненные по заказу Департамента энергетических технологий на транспорте (US Department of Energy Vehicle Technologies) Правительства США в рамках изучения уровня и перспектив зарубежных альтернативных технологий в области транспорта. По информации компании Toyota, автомобиль Prius 2010 года по сравнению с предыдущим поколением имеет лучшую топливную экономичность: 51 миля на галлон топлива в городских условиях и 48 миль на магистралях. На нем установлена гибридная силовая установка Hybrid Synergy Drive, состоящая из ДВС объемом 1,8 литра, ГЭМТ с двумя МГ и никль-металлгидридной аккумуляторной батареей мощностью 27 кВт, что дает суммарную мощность 100 кВт (136 л. с.).

На рисунке 11 показана статическая зависимость суммарного КПД МГ и инвертора ГЭМТ этого автомобиля от скорости и крутящего момента, а на рисунке 12 — та же зависимость, но с удаленной областью, в которой КПД ниже 77 %. На графиках нанесены кривые равного КПД. Задачей системы управления ГЭМТ является удержание МГ в зоне максимально возможного КПД для любого режима, задаваемого оператором. Видно, что он меняется в широких пределах — от 95 % до 60 % (речь не о ГСУ в целом), причем самый низкий — на стоповом режиме при больших нагрузках (более 100 Н·м). Левая верхняя зона графика показывает максимальную нагрузочную способ-

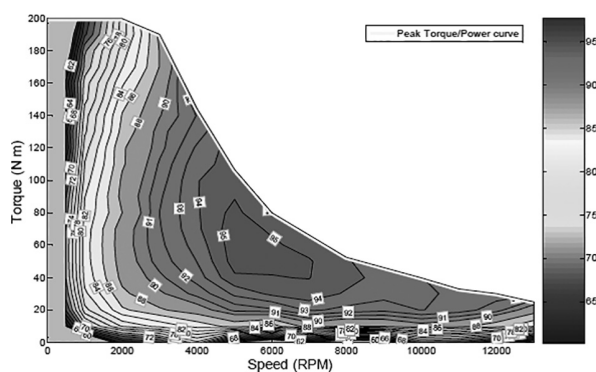


Рисунок 11 — Зависимость суммарного КПД мотор-генератора и инвертора ГЭМТ автомобиля Toyota Prius модели 2010 года от скорости и нагрузки [12]

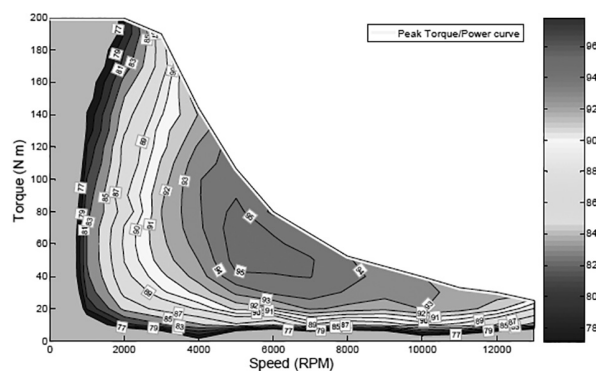


Рисунок 12 — Зависимость суммарного КПД мотор-генератора и инвертора ГЭМТ автомобиля Toyota Prius модели 2010 года от скорости и нагрузки с КПД не менее 77 % [12]

ность. Данный МГ может развивать мощность 60 кВт в течение 18 секунд, на протяжении которых температура обмоток статора достигнет предельной величины 150 градусов. Эта длительность соответствует установившимся требованиям, хотя в действительности она длится не более секунды. Вся электрическая система имеет жидкостное охлаждение этилен-гликолевой смесью.

В дополнение к сказанному следует отметить, что примерно такая же картина зависимости КПД МГ от скорости и нагрузки (интенсивности торможения) имеет место и при регенеративном электрическом торможении. На эффективность регенеративного торможения оказывает влияние, в частности, топология кинематической схемы ГЭМТ.

К настоящему времени опубликовано большое количество материалов об экономии топлива и снижении выбросов токсичных веществ автомобилями с ГСУ. Ниже приведены результаты испытаний гибридных развозных фургонов с ГЭМТ компании Eaton, проведенных Национальной лабораторией возобновляемой энергии (National Renewable Energy Laboratory — NREL) Департамента энергии (Department of energy — DOE) Правительства США [13]. В течение 12 месяцев испытывалась группа из шести обычных дизельных развозных автомобилей-фургонов модели

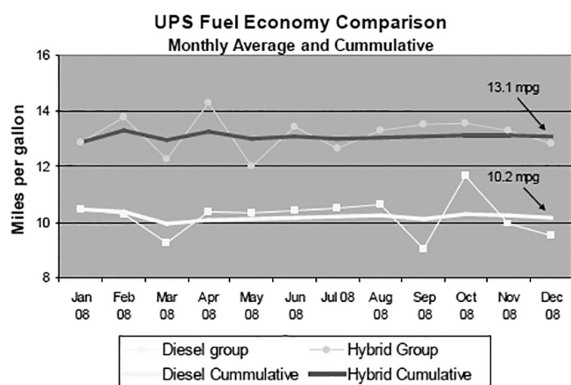


Рисунок 13 — Сравнение экономии топлива гибридными автомобилями и дизельными автомобилями с механической трансмиссией [13]

Freightliner P70D выпуска 2007 года полным весом 14 360 фунтов (с шестиступенчатыми АМТ) и шести таких же автомобилей модели Freightliner P70H 2006 года (15 200 фунтов) с гибридными силовыми установками Eaton. Режимы испытаний соответствовали трем видам стандартных циклов. Конечные итоги испытаний показаны на рисунке 13, где дано сравнение расхода топлива гибридными автомобилями и дизельными с механической трансмиссией, выраженного в милях на галлон. Тонкими линиями соединены точки, соответствующие значениям расходов в течение каждого месяца на протяжении испытаний, а жирными — кумулятивные значения. Обычные проходили в среднем 10,2 миль на одном галлоне, а гибриды — 13,1 миль. Экономия — 2,9 мили, т. е. 28,9 %.

Параллельно описанным выше эксплуатационным испытаниям проводились также лабораторные, в процессе которых, кроме расхода топлива, оценивались вредные выбросы. Испытывались другие (но похожие) развозные автомобили Workhorse P100 с другими дизелем и АТ Allison, полным весом 17 500 фунтов. В гибридном варианте — они же с ГЭМТ Eaton. На рисунке 14 приведены результаты испытаний по городскому ездовому циклу. Видно, что гибриды дают на этом цикле на 37 % меньший расход топлива, на 30% меньше выбросов CO₂, на 16 % меньше CO, но на 13 % больше NO_x. В процессе этих испытаний не было обнаружено статистически значимых различий с данными от крупных автопарков, эксплуатирующих такие машины. Также отмечено снижение на 15 % эксплуатационных затрат. Эти результаты оказались столь значительны, что от некоторых автопарков сразу поступили крупные заказы на такие гибриды [13].

Рассмотренные выше глобальные тенденции уже привели ведущих производителей трансмиссий большой мощности к необходимости пересмотра основ технической политики — к переходу от производства монотипных типоразмерных рядов к модульному построению трансмиссий раз-

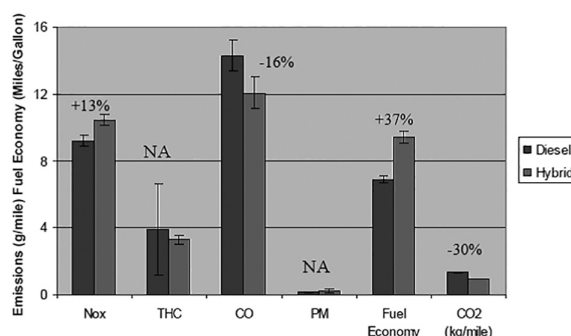


Рисунок 14 — Экономия топлива и снижение вредных выбросов гибридными автомобилями Workhorse P100 (результаты лабораторных испытаний) [13]

личных типов на основе многофункциональных наборов модулей.

Судя по публикациям, раньше и дальше всех пошла в этом направлении известная немецкая компания Zahnrad Fabrik, которая активно рекламирует и продвигает на рынки свою новейшую разработку — модульную трансмиссию TraXon [14]. Она представляет собой платформу автоматических трансмиссий для тяжелых грузовых автомобилей общим весом до 60 тонн, состоящую из пяти модулей. В числе последних, кроме базовой коробки передач, имеются гидротрансформатор, мотор-генератор, одиночное «сухое» и сдвоенное сцепления. С их помощью можно построить практически все основные модификации АТ — АМТ, ГМП, ГЭМТ, ДСТ — под заказы конкретных потребителей. По мнению компании, эта трансмиссия устанавливает новые стандарты в области эффективности, комфорта и гибкости применения. Для нее разработана стратегия PreVision GPS с использованием GPS-навигации, что позволяет реализовать управление динамикой движения с предвидением и повышает экономию топлива. Трансмиссия предлагается в 12- и 16-ступенчатом вариантах с прямой или повышающей ступенью, с двумя или четырьмя ступенями заднего хода. КПД базовой коробки передач около 99,7 %.

Примечательна и такая особенность, которую компания определяет как «rolling function»: перевод трансмиссии на нейтраль в подходящих дорожных условиях, что позволяет двигаться накатом на холостом ходу двигателя для снижения потерь. При этом система навигации немедленно оповещает о приближении опасного уклона, а двигатель и трансмиссия автоматически переводятся в режим торможения.

Описанные выше технологии в сущности заключаются в оптимизации режимов совместного функционирования ДВС и АТ в составе интегрированной силовой установки. При этом не снимаются с повестки дня и мероприятия по повышению КПД самой АТ (как и ДВС). Ниже приведены только два из них. Это выбор соответствующей рабочей жидкости и характеристик самой гидросистемы АТ.

На рисунке 15 показано влияние вязкости двух видов рабочей жидкости (АТФ) на холостые потери гидромеханической АТ 5 HP 24. При снижении вязкости потери снижаются на 13 %, что в итоге дает уменьшение расхода топлива на 1 % [7].

В вариантах ДСТ с «мокрыми» многодисковыми сцеплениями гидросистема смазки и охлаждения создает дополнительные затраты мощности. Однако и здесь имеются возможности для экономии. Так, в [15] проведено исследование путей совершенствования гидросистемы на примере пятиступенчатой ДСТ. По результатам моделирования и экспериментальных исследований на стенде построена нормализованная зависимость приведенных к давлению в гидросистеме суммарных гидравлических потерь (включая барботажные) в ДСТ от расхода жидкости, показанная на рисунке 16. Поскольку производительность нерегулируемых насосов выбирается для полного обеспечения потребностей трансмиссий уже на минимальной скорости ДВС и почти пропорционально возрастает при дальнейшем увеличении скорости, на максимуме она многократно превышает требуемую величину. Показано, что переход от нерегулируемых шестеренных насосов к регулируемым насосам с системами автоматического регулирования позволяет на всех скоростных режимах автомобиля устанавливать их производительность в соответствии с фактическими по-

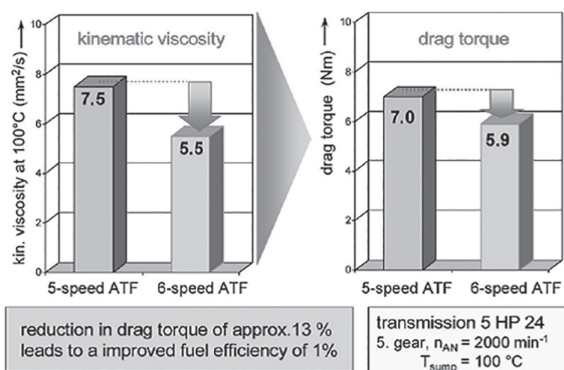


Рисунок 15 — Влияние вязкости рабочей жидкости на холостые потери в гидромеханической АТ [7]

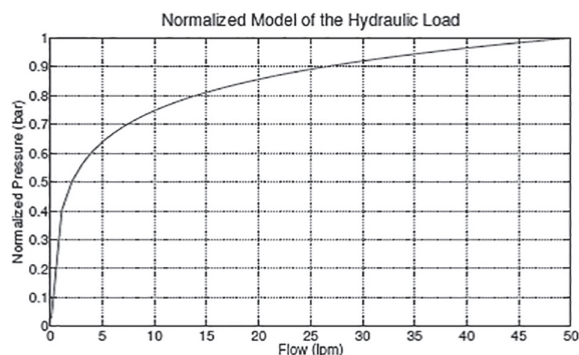


Рисунок 16 — Модель гидравлической нагрузки ДСТ зависимость нормализованного давления (бар) в гидросистеме от расхода жидкости (л/мин) [15]

требностями ДСТ. Это обеспечивает повышение ее КПД до 2,06 % [15].

Выше оценивался потенциал различных типов АТ по снижению расхода топлива. Показано, что практически у каждой из них высокий эффект достигается увеличением числа механических ступеней, что позволяет удерживать ДВС близко к точке минимального расхода топлива на всех режимах. Следует добавить, что необходимым условием получения такого эффекта является высококачественное автоматическое управление. Выше были примеры, где установка нового программного обеспечения давала экономию даже на ранее выпущенных АТ (компания Allison). А переход на восемь ступеней совместно с технологией «старт-стоп» обеспечил почти такую же экономичность, как ГЭМТ.

Таким образом, уже при восьми-девяти ступенях этот процесс подходит к разумному пределу. При этом существенно возрастает и сложность конструкции АТ, о которой можно судить по рисунку 17, где показана в разрезе новая девятиступенчатая гидромеханическая планетарная АТ Mercedes 9G-TRONIC [16]. Здесь четко видны (слева направо) фрикцион блокировки гидротрансформатора, демпфер крутильных колебаний с тангенциальным расположением витых цилиндрических пружин, гидротрансформатор, четырехрядный планетарный механизм и шесть многодисковых фрикционов. В поддоне расположена вся мехатронная система управления, включая блок гидравлических регуляторов давления, распределителей, электрогидравлических пилотных клапанов и платы электроники.

Автомобиль Mercedes E 350 BLUETEC с этой инновационной трансмиссией и шестицилиндровым дизелем оказался одним из самых экономичных в своем премиум-классе с расходом 5,3 л/100 км. При этом АТ обеспечивает высокий комфорт и едва ощутимые переключения [17].

Видимо, следует ожидать, что в ходе реализации новых стандартов будут появляться и новые конструкции АТ. Так, Toyota уже объявила о переходе на новую глобальную архитектуру силовых установок — TNGA (Toyota New Global Architecture) — в рамках которой она планирует в течение пяти лет, начиная с 2017 года, уже к 2021 году на 60 % выпускаемых автомобилей

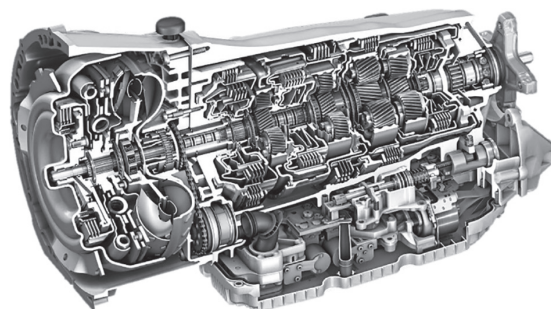


Рисунок 17 — Девятиступенчатая АТ Mercedes 9G-TRONIC [16]

снизить выбросы CO₂ на 15 % и более. При этом будет выпущено 17 версий девяти моделей ДВС, 10 версий четырех моделей АТ, бесступенчатая трансмиссия нового типа, а также 10 версий шести гибридных систем [18]. А General Motors и Ford, по опубликованной информации, готовят к выпуску гидромеханическую АТ с десятью-одиннадцатью ступенями.

Заключение. С 2017 года вступил в силу пакет стандартов CAFE на период до 2025 года. Они были опубликованы в 2012 году, и пятилетняя пауза была необходима промышленности для подготовки к новым жестким требованиям. Утверждению предшествовало их активное обсуждение и критика многочисленных противников. Поскольку фактически речь идет о революционном изменении конструкции легковых и легких грузовых автомобилей с целью снижения потребления ими топлива на 50 % в кратчайшие сроки.

При том, что это сложнейшая глобальная задача для всего научно-технического и производственного комплекса автомобилестроения (прежде всего американского), она, безусловно, затронет весь мир, так как американский рынок — важнейший для всех ведущих компаний, и для присутствия на нем нужно соответствовать CAFE. Что, в свою очередь, приведет к переходу на данные стандарты Японии, Германии и других стран.

Что же это дает?

С одной стороны, бесспорно, снижение загрязнения атмосферы, которое будет усиливаться по мере обновления состава глобального парка автомобилей. Этот эффект будет достигнут в первую очередь за счет сокращения количества сжигаемого топлива, и во вторую — уменьшения токсичных компонентов в выхлопных газах. Существенное усложнение конструкции влечет за собой соответствующее подорожание. Задаются вопросы: покроет ли экономия на топливе эти дополнительные затраты рядового потребителя.

С другой стороны, производители, видимо, быстро оценили существенное повышение топливной экономичности как принципиально важный для покупателя фактор и начали готовиться к его использованию задолго до 2012 года. Хотя первую в мире восьмиступенчатую АТ Toyota показала еще в 2007 году, именно в 2012–2013 гг. уже появились в производстве АТ других компаний с восемью, затем девятью ступенями.

Поэтому важность использования высокого потенциала АТ в решении рассматриваемых задач представляется бесспорной.

Список литературы

1. Концентрация CO₂ в атмосфере выросла до максимума за последние 800 тысяч лет [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://news.tut.by/world/566803.html>. — Дата доступа: 30.10.2017.
2. Мировое производство и продажи автомобильной техники / Некоммерческое партнерство «ОБЪЕДИНЕНИЕ

- АВТОПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ РОССИИ» [Электронный ресурс]. — Дата доступа: 31.01.2017.
3. Динамика производства автомобилей в мире с 2000 по 2014 год по странам [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ray-idaho.ru/blog/2016/01/21/%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0-%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D0%B5%D0%B9-%D0%B2-3//>. — Дата доступа: 30.10.2017.
4. Cost, Effectiveness and Deployment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles // The National Academies Press [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.nap.edu/21744>. — Date of access: 31.01.2017.
5. White House Finalizes 54.5 MPG CAFE Standards for 2017-2025 Model Years [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.dailytech.com/White+House+Finalizes+54.5+MPG+CAFE+Standards+for+2017+2025+Model+Years+/article25543.htm>. — Date of access: 28.08.2017.
6. Euro 6 Technology Already Improving Real World NO_x [Electronic resource].
7. How to Minimize Power Losses in Transmissions, Axles and Steering Systems / GEAR TECHNOLOGY [Electronic resource]. — Mode of access: https://www.geartechnology.com/articles/0912/How_to_Minimize_Power_Losses_in_Transmissions,_Axles_and_Steering_Systems/. — Date of access: 09.2017.
8. Allison TC10 TS Transmission: The Transmission that Will Revolutionize the Trucking Industry // Diesel Power [Electronic resource]. — May 1, 2012. — Mode of access: <http://www.trucktrend.com/how-to/transmission-drivetrain/1205dp-allison-tc10-ts-transmission/>. — Date of access: 01.09.2017.
9. Allison Transmission Offers 5 percent Better Fuel Economy with TC10 for Tractor Trucks // Allison Transmission [Electronic resource]. — 2013. — Mode of access: <http://www.allisontransmission.com/en-gb/company/news-article/details/2013/06/04/allison-transmission-offers-5-percent-better-fuel-economy-with-tc10-for-tractor-trucks>.
10. Allison introduces new transmission package made for fuel efficiency [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.Cejdigital.com/topictag/worktruckconexpo>. — Date of access: 05.03.2014.
11. Kenworth Adds FuelSense Package to Trucks // HDT Truckinginfo [Electronic resource]. — Sept. 4, 2014. — Mode of access: <http://www.truckinginfo.com/channel/fuel-smarts/product/detail/2014/09/kenworth-adds-fuelsense-package-to-medium-duty-tr.aspx>.
12. Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid Synergy Drive System // ORNL/TM-2010/253 [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.osti.gov/scitech/biblio/1007833>.
13. Lammert, M. Twelve-Month Evaluation of UPS Diesel Hybrid Electric Delivery Vans / M. Lammert // Technical Report NREL/TP-540-44134 [Electronic resource]. — Dec., 2009. — Mode of access: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/44134.pdf>.
14. TraXon from ZF a modular automatic heavy transport transmission // Diesel. News.com.au [Electronic resource]. — May 22, 2013. — Mode of access: <http://www.dieselnews.com.au/traxon-from-zf-a-modular-automatic-heavy-transport-transmission/>.
15. Effect of Pump selection on Fuel Economy in a Dual Clutch Transmission Vehicle [Electronic resource] / Rahul Ahlawat [et al.] // American Control Conference Hyatt Regency Riverfront [Electronic resource]. — St. Louis, MO, USA, June 10–12, 2009. — Mode of access: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5160309/>.
16. The new automatic transmission 9G-Tronic from Mercedes-Benz [Electronic resource] / Christoph Dörr, Manfred Homm, Guenter Indlekofer. — Mode of access: http://documents.epfl.ch/users/f/fr/froulet/www/Mechanics/A1_Paper.pdf.
17. The Mercedes-Benz E 350 BlueTEC will feature 9G-TRONIC nine-speed automatic transmission // Car engineer [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.car-engineer.com/the-mercedes-benz-e-350-bluetec-will-feature-9g-tronic-nine-speed-automatic-transmission>. — Date of access: 24.07.2013.
18. Toyota unveils new TNGA-based engines and transmissions and improved hybrid systems; deployment begins in 2017 // Green Car Congress [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.greencarcongress.com/transmissions/>. — Date of access: 13.09.2017.

KRASNEVSKIY Leonid G., Corresponding Member of the NAS of Belarus,
D. Sc. in Eng., Prof.

Chief Researcher

E-mail: krasnevski_l@tut.by

Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 17 August 2017.

ENERGY EFFICIENCY OF POWER PLANTS: THE POTENTIAL OF AUTOMATIC TRANSMISSIONS TO MEET NEW INTERNATIONAL REQUIREMENTS

An analysis of new requirements for environmental standards for 2017–2025 years from the standpoint of using the technical capabilities of modern automatic transmissions (ATs), including the hybrid ones, to increase the fuel efficiency of power plants of mobile vehicles, was conducted. It is shown that high potential of the main types of ATs is connected with possibility of ensuring the operation of a thermal engine near the zone of minimum fuel consumption – the closer, the more mechanical steps AT has. Current level is 9–10 in passenger cars and 10–14 in heavy hydromechanical and mechanical ATs, which brings them closer to the hybrid ones in terms of the effect size. In addition, there are reserves of increasing the efficiency of ATs by reducing their internal losses.

Keywords: energy efficiency of power plants, mobile machines, automatic transmissions, hybrid power units

References

1. *Koncentracija CO₂ v atmosfere vyroslo do maksimuma za poslednie 800 tysjach let* [Concentration of CO₂ in the atmosphere has risen to a maximum over the last 800 thousand years]. Available at: <https://news.tut.by/world/566803.html/> (accessed 30 October 2017).
2. *Mirovooe proizvodstvo i prodazhi avtomobilnoj tehniki* [World production and sales of automotive equipment]. *Nekommercheskoe partnerstvo "Obedinenie Avtoproizvoditelej Rossii"* [Nonprofit Partnership "The Association of Russian Automakers"] (accessed 31 October 2017).
3. *Dinamika proizvodstva avtomobilej v mire s 2000 po 2014 god po stranam* [Dynamics of production of cars in the world from 2000 to 2014 by countries]. Available at: <http://www.ray-idaho.ru/blog/2016/01/21/%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0-%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D0%B5%D0%B9-%D0%B2-3/> (accessed 30 October 2017).
4. Cost, Effectiveness and Deployment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles. *The National Academies Press*. Available at: <http://www.nap.edu/21744/> (accessed 31 January 2017).
5. *White House Finalizes 54.5 MPG CAFE Standards for 2017-2025 Model Years*. Available at: <http://www.dailytech.com/White+House+Finalizes+54.5+MPG+CAFE+Standards+for+2017+2025+Model+Years+/article25543.html/> (accessed 28 August 2017).
6. *Euro 6 Technology Already Improving Real World NO_x* [Electronic resource].
7. How to Minimize Power Losses in Transmissions, Axles and Steering Systems. *Gear Technology*. Available at: https://www.geartechology.com/articles/0912/How_to_Minimize_Power_Losses_in_Transmissions,_Axles_and_Steering_Systems/ (accessed September, 2017).
8. Allison TC10 TS Transmission: The Transmission that Will Revolutionize the Trucking Industry. *Diesel Power* [Electronic resource]. Available at: <http://www.trucktrend.com/how-to/transmission-drivetrain/1205dp-allison-tc10-ts-transmission/> (accessed September, 2017).
9. Allison Transmission Offers 5 percent Better Fuel Economy with TC10 for Tractor Trucks. *Allison Transmission* [Electronic resource]. Available at: <http://www.allisontransmission.com/en-gb/company/news-article/details/2013/06/04/allison-transmission-offers-5-percent-better-fuel-economy-with-tc10-for-tractor-trucks>.
10. *Allison introduces new transmission package made for fuel efficiency*. Available at: <http://www.Ccjdigital.com/topictag/worktruckconexpo/>.
11. Kenworth Adds Fuel Sense Package to Trucks. *HDT Trucking info* [Electronic resource]. Available at: <http://www.truckinginfo.com/channel/fuel-smarts/product/detail/2014/09/kenworth-adds-fuelsense-package-to-medium-duty-tr.aspx/>.
12. Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid Synergy Drive System. *ORNL/TM-2010/253*. Available at: <https://www.osti.gov/scitech/biblio/1007833/>.
13. Lammert M. Twelve-Month Evaluation of UPS Diesel Hybrid Electric Delivery Vans. *Technical Report NREL/TP-540-44134*. (Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/44134.pdf/>).
14. TraXon from ZF a modular automatic heavy transport transmission. *Diesel News.com.au*. Available at: <http://www.dieselnews.com.au/traxon-from-zf-a-modular-automatic-heavy-transport-transmission/>.
15. Rahul Ahlawat [et al.] Effect of Pump selection on Fuel Economy in a Dual Clutch Transmission Vehicle. *American Control Conference Hyatt Regency Riverfront*. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5160309/>.
16. Dörr C., Homm M., Indlekofer G. *The new automatic transmission 9G-Tronic from Mercedes-Benz*. Available at: http://documents.epfl.ch/users/f/fr/froulet/www/Mechanics/A1_Paper.pdf/.
17. The Mercedes-Benz E 350 BlueTEC will feature 9G-TRONIC nine-speed automatic transmission. *Car engineer*. Available at: <http://www.car-engineer.com/the-mercedes-benz-e-350-bluetec-will-feature-9g-tronic-nine-speed-automatic-transmission>.
18. Toyota unveils new TNGA-based engines and transmissions and improved hybrid systems; deployment begins in 2017. *Green Car Congress* [Electronic resource]. Available at: <http://www.greencarcongress.com/transmissions/> (accessed 13 September 2017).