

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫМ БЛОКОМ АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С МЕХАНИЧЕСКОЙ БЕССТУПЕНЧАТОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

Терентьев А.Б.¹, Юркевич А.В.², Солдаткин В.А.², Терешин А.В.²

¹ООО «Завралавтоматика», Курган;

²Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения
Российской академии наук, Екатеринбург

Ключевые слова: автотранспортное средство, двигатель внутреннего сгорания, механическая бесступенчатая передача, силовая функция, алгоритм управления, автоматизация, энергоэффективность.

Аннотация. В статье представлен алгоритм управления энергосиловым блоком автотранспортного средства (АТС), состоящим из двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и механической бесступенчатой передачи. Алгоритм управления реализован на базе программируемых микроконтроллеров. Он позволяет от одной педали независимо управлять частотой вращения вала двигателя и амплитудой колебаний внутренних звеньев передачи. Это обеспечивает работу двигателя в точках его характеристики, соответствующих минимальному эффективному удельному расходу топлива при любой требуемой по условиям движения АТС мощности. Приведен пример функционирования алгоритма при натуральных испытаниях ходового макета АТС УАЗ с бесступенчатой передачей. Сравнительные испытания макета на топливную экономичность с установленными в трансмиссии бесступенчатой передачей и штатной коробкой передач проведены в одном элементарном городском цикле – разгоне до 15 км/час. Результаты показали, что расход топлива при использовании бесступенчатой передачи и управлении энергосиловым блоком по разработанному алгоритму снижен на 23,5-28,4% при среднем значении 25,5%.

THE CONTROL ALGORITHM OF THE ENERGY-POWER UNIT OF A MOTOR VEHICLE WITH A MECHANICAL CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION

Terentiev A.B.¹, Yurkevich A.V.², Soldatkin V.A.², Tereshin A.V.²

¹Zauralavtomatika LLC, Kurgan;

²Institute of Engineering Science Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg

Keywords: motor vehicle, internal combustion engine, continuously variable transmission, power function, control algorithm, automation, energy efficiency.

Abstract. The paper presents the control algorithm for an energy-power unit of a motor vehicle consisting of an internal combustion engine (ICE) and a continuously variable mechanical transmission. The control algorithm is implemented on the basis of programmable microcontrollers. It allows one pedal to independently control the rotation frequency of ICE shaft and the oscillation range of internal transmission links. This ensures the operation of the engine in its characteristic points that correspond to the minimum efficient specific fuel consumption at any capacity that is required by the traffic conditions for a vehicle. An example of the functioning of the algorithm during full-scale tests of the prototype vehicle with a continuously variable transmission (CVT) on the basis of an UAZ is given. Comparative fuel efficiency testing of the prototype vehicle with a CVT and a standard gearbox installed in the transmission was carried out in one elementary urban cycle – acceleration to 15 km/h. The results showed that fuel consumption when using a CVT and controlling the energy-power unit according to the developed algorithm is reduced by 23.5-28.4% with an average value of 25.5%.

Введение

У большинства автотранспортных средств (АТС) энергосиловой блок включает в себя поршневой двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и трансмиссионную систему. Это имеет место, несмотря на то, что государства вкладывают значительные средства в разработку экологически чистых электромобилей [1, 2]. Однако вопроса о полном отказе от применения на АТС поршневых ДВС пока не стоит. Особенно это касается использования АТС в удаленной от городов местности с отсутствующей специальной инфраструктурой. Даже промежуточный вариант активно разрабатываемой комбинированной энергетической установки (КЭУ), так называемый гибрид, также включает в себя ДВС [3, 4]. Поэтому повышение

энергоэффективности энергосилового блока, включая вопрос обеспечения экологической безопасности, является важнейшей проблемой, которая в настоящее время остается актуальной.

Повсеместное внедрение электроники в устройства управления современным ДВС [5, 6] благодаря применению микропроцессоров, позволяет осуществить рабочий процесс двигателя с минимизацией расхода топлива для любого сочетания крутящего момента и частоты вращения вала (нагрузочного и скоростного режимов).

В эксплуатации различных типов АТС нагружение ДВС осуществляется в условиях независимого изменения скорости движения и внешнего сопротивления при затрате определенной мощности. Этой мощности соответствует множество сочетаний крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала. Поэтому задача управления энергосиловым блоком будет заключаться в том, чтобы при помощи трансмиссии из этого множества выбрать такое сочетание, при котором двигатель будет работать с наименьшим удельным расходом топлива. Осуществить такое управление даже опытному водителю практически невозможно. Выход именно на это сочетание может обеспечивать система автоматического управления трансмиссией. Проблема повышения энергоэффективности энергосилового блока может быть решена, если обеспечить работу ДВС в точках его характеристики, соответствующих минимальному эффективному удельному расходу топлива и соответственно максимальному КПД при любом значении требуемой от него мощности. Поэтому при разработке трансмиссионных систем АТС в первую очередь уделяется внимание именно этому ключевому вопросу.

У известных систем такие возможности весьма ограничены или требуют сложного алгоритма управления при неизбежных потерях на преобразование энергии из одного вида в другой и обратно.

В работе [7] показано, что для того, чтобы организовать работу двигателя на режимах, соответствующих минимальному удельному эффективному расходу топлива, обязательно должна существовать, гибкая связь между двигателем и элементами трансмиссии. То есть частота вращения и крутящий момент, развиваемый ДВС должны иметь возможность регулироваться независимо.

В работе [8] показано, что бесступенчатые передачи в трансмиссии, помимо облегчения труда водителя, могут обеспечить регулирование двигателя для осуществления его работы на наиболее выгодных режимах.

Профессором А.А. Благоднавым было предложено осуществить радикальное решение этой проблемы путем трансформации потока механической энергии при помощи новой механической бесступенчатой передачи с регулируемыми внутренними силовыми функциями [9, 10]. В этой передаче в отличие от известных многопоточных импульсных вариаторов [11] механизмы свободного хода дополнены упругими валами – торсионами, в результате чего такой вариатор превращается в непрерывный трансформатор – механическую бесступенчатую передачу. Силовые функции возникают при закручивании торсионных валов под нагрузкой. Использование силовых функций обеспечивает регулируемую внутреннюю автоматичность при бесконечно большом кинематическом и значительном силовом диапазонах передачи [12]. Там же приведена кинематическая схема передачи и подробно изложен принцип ее работы.

Экспериментально подтверждена [13] возможность при управлении изменять независимо уровень силовой функции (амплитуды колебаний механических выпрямителей) и частоты вращения ведущего вала, что позволяет механической бесступенчатой передачей нагрузить двигатель в его оптимальной точке при любой потребной мощности. Разработка универсального алгоритма управления энергосиловым блоком с такой механической бесступенчатой передачей – задача настоящей статьи.

Используемые в алгоритме управления теоретические соотношения

Теоретические соотношения, используемые для построения алгоритма, могут быть представлены в виде математической модели нагружающего воздействия передачи Благоднава на двигатель. Они включают в себя уравнения [9, 10], связывающие моменты

на ведущем M_1 и ведомом M_2 валах передачи, частоты вращения ведущего ω_1 и ведомого ω_2 валов, амплитуду колебаний φ_0 , а также среднего φ_T^{cp} и максимального φ_T^{max} угла закручивания торсионного вала с внутренним передаточным отношением i_T .

$$M_1 = iM_2, \quad (1)$$

$$M_2 = c_m \varphi_m^{cp} N / i_p, \quad (2)$$

$$i = i_n i_T i_p = \omega_2 / \omega_1, \quad (3)$$

$$\varphi_T^{cp} = \varphi_0 [\cos(\omega_1 t_1) - \cos(\omega_1 t) - i_T \omega_1 (t - t_1)] \text{ или}$$

$$\varphi_T^{cp} = \varphi_0 (b_1 + b_2 i_T + b_3 i_T^2 + b_4 i_T^3 + b_5 i_T^4), \quad (4)$$

$$\varphi_T^{max} = 2\varphi_0 \left[(1 - i_T^2)^{0.5} - 0,5 i_T (\pi - 2 \arcsin(i_T)) \right], \quad (5)$$

где i_n – передаточное отношение преобразователя колебаний, которое для гармонических колебаний равно φ_0 ; i_p – передаточное отношение суммирующего редуктора; b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 – аппроксимирующие коэффициенты: $b_1 = 1,0$, $b_2 = -2,657$, $b_3 = 2,921$, $b_4 = -1,929$, $b_5 = 0,665$; N – количество торсионных валов, например $N = 5$; c_T – жесткость торсионного вала; $\omega_1 t_1$ – фазовый угол включения выпрямителя $\omega_1 t_1 = \arcsin(i_T)$; $\omega_1 t_3$ – фазовый угол выключения выпрямителя, $\omega_1 t_3$ является решением трансцендентного уравнения $\cos \omega_1 t_1 - \cos \omega_1 t_3 - i_m (\omega_1 t_3 - \omega_1 t_1) = 0$.

Кроме этого, имеют место зависимости $\varphi_0(i)$, ограничивающие амплитуду колебаний по условиям допустимой нагрузке торсионных валов и по нагрузке двигателя. Закон изменения амплитуды колебаний φ_0 , обеспечивающий ограничение максимальной нагрузки на торсионы по условиям прочности $\varphi_T^{max} \leq [\varphi_T^{max}]$. Такое значение должна ограничивать система управления с помощью изменения амплитуды колебаний. Момент нагружающий двигатель, не должен превышать момент двигателя M_N ($M_1 \leq M_N$) при соответствующей частоте вращения $\omega_1 = \omega_0$. Кроме этого, максимальная амплитуда колебаний коромысла φ_0 определяемая конструкцией передачи, не должна превышать, например 0,3 радиана. На рисунке 1а представлены указанные ограничения в зависимости от передаточного отношения i , построенные по результатам решения уравнений (1)–(5) численным методом. Ограничения 3 накладываются ДВС с различными максимальными моментами M_N .

Для поиска закона изменения амплитуды колебаний φ_0 и частоты вращения вала двигателя $\omega_0 = \omega_1$, обеспечивающего экономичный режим (минимальный удельный расход топлива при каждом значении требуемой мощности) требуется, например, многопараметровая характеристика объекта регулирования – конкретного ДВС. При этом в уравнение (1) вместо M_1 подставляется требуемый закон изменения $M_0(\omega_1)$ взятый с этой характеристики. В качестве примера на рисунке 1б приведена многопараметровая характеристика ДВС с нанесенными на ней точками нагружения его механической бесступенчатой передачей (график БП) при выполнении погрузчиком ПК-40 стандартных технологических операций. Оптимальное управление передачей дает расчетную экономию топлива 26% по сравнению с погрузчиком, у которого в трансмиссии установлена гидромеханическая передача (график ГМТ) [14]. Следует отметить, что расчетная энергетическая эффективность комбинированных энергоустановок [15] с нагружением ДВС по аналогичному оптимальному закону дает экономию топлива порядка 30%.

На рисунке 2 для ДВС ЗМЗ 402 и механической бесступенчатой передачи с жесткостью торсионов $c_T = 578$ Н.м/рад приведены синтезированные законы регулирования механической бесступенчатой передачи (изменения амплитуды колебаний), обеспечивающие постоянство скоростного режима АТС $n_2 = const$ (рис. 2а) при различных постоянных

нагрузках на двигатель – M_1 и постоянство момента на ведомом валу передачи $M_2 = const$ (рис. 2б). Следует отметить, что при этом режим работы ДВС (M_1, n_1) уже не будет оптимальным с точки зрения обеспечения минимального расхода топлива. Кроме этого, не имеет значения, за счет чего будет получено изменение передаточного отношения или путем изменения n_1 или n_2 . Наложение на эти зависимости ограничений (см. рис. 1а) определяет диапазоны эффективного функционирования передачи в комплексе с ДВС.

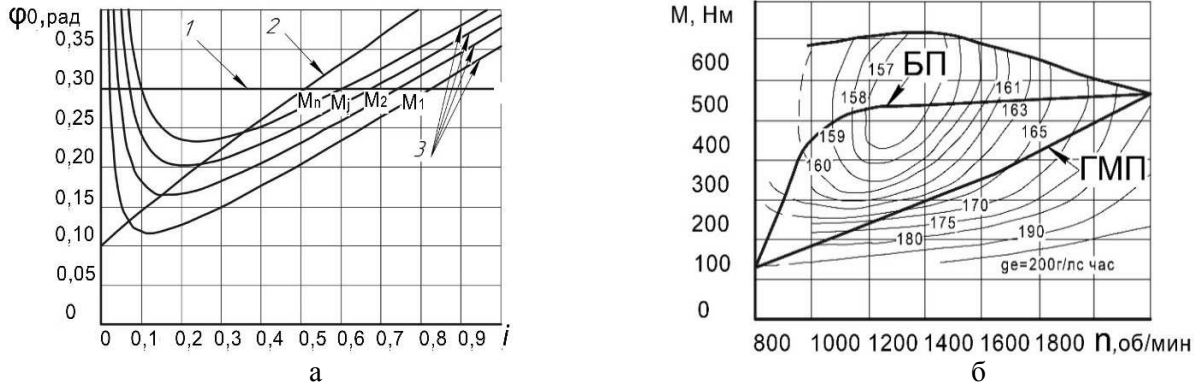


Рис. 1. Законы управления передачей и нагружения двигателя: а – ограничения амплитуды колебаний ϕ_0 коромысла выпрямителей; 1 – конструкцией преобразователя; 2 – прочностью торсиона; 3 – возможным моментом двигателя, $M_1 < M_2 \dots M_j < M_n$; б – многопараметровая характеристика ДВС с точками нагружения: БП – бесступенчатой передачей, ГМП – гидромеханической передачей

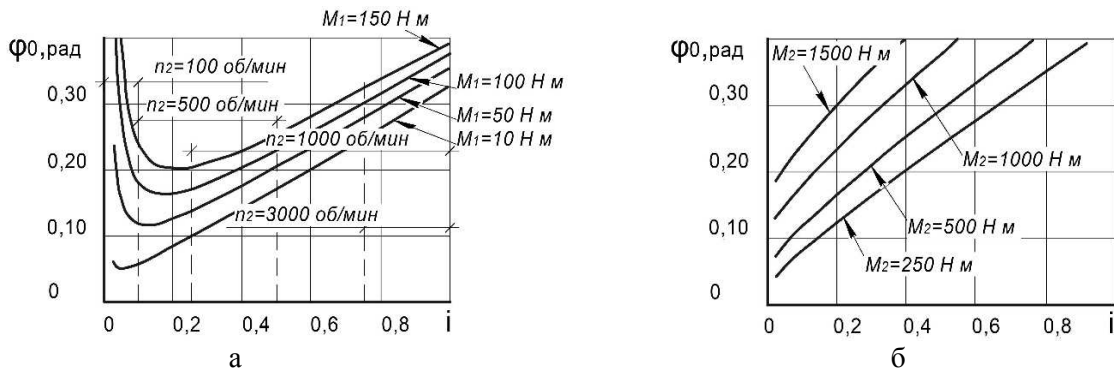


Рис. 2. Синтезированные законы управления передачей

Управление системой двигатель – бесступенчатая передача по мере увеличения потребной мощности осуществляется так: сначала при достаточно малой частоте n_1 увеличивается амплитуда колебаний ϕ_0 , что вызывает увеличение момента, нагружающего двигатель, до значения, соответствующего внешней характеристике. И только после этого дальнейшее увеличение развиваемой мощности осуществляется с помощью увеличения частоты n_1 . Смысл такого регулирования заключается в том, чтобы максимально снизить механические потери в двигателе, которые пропорциональны частоте n_1 . Оказалось, что такое регулирование совпадает с регулированием по экономичному режиму. Закон, обеспечивающий мах КПД совпадает с законом регулирования ϕ_0 обеспечивающим минимальный расход топлива.

Таким образом, представленного материала достаточно для теоретического обеспечения проектирования алгоритма функционирования системы автоматического регулирования бесступенчатой передачи с внутренней силовой функцией.

В теоретической работе [16] на схемном уровне, достаточно подробно, представлена техника автоматического регулирования такой бесступенчатой передачи. Там же показано, что независимое изменение двух переменных – частоты вращения коленчатого вала двигателя и амплитуды колебаний внутренних звеньев можно производить от одной педали. Предложено чисто механическое устройство для измерения передаточного отношения i при установленных ограничениях ϕ_0 в зависимости от i . Алгоритм управления полностью зависит

от формы двух профильных кулаков, жестко связанных с педалью. Это обеспечивает выполнение только одной программы.

Те же вопросы, но с более гибкой настройкой системы и многообразием реализуемых алгоритмов управления, могут быть решены достаточно просто при помощи современных электронных компонентов, силовых исполнительных устройств и бортового программируемого микроконтроллера с загруженным в память алгоритмом, с помощью которого осуществляется соответствующее управление подачей топлива ДВС и изменение амплитуды колебаний коромысел выпрямителей.

Принципиальная схема алгоритма и результат его реализации

Одной из основных задач водителя при управлении АТС является регулирование скорости движения, которую он избирает по своему усмотрению в зависимости от дорожных условий. В транспортных средствах с механической бесступенчатой передачей управление должно быть только от двух педалей: педали ускорения и педали торможения.

При управлении ускорением водитель, задавая ход педали h , устанавливает реализуемую интенсивность движения (скорость и ускорение). Выполняя функции звена обратной связи, он оценивает отличие полученной интенсивности от требуемой и увеличивает или уменьшает h . При этом независимой переменной (аргументом) является h , а функциями могут быть только две переменных: $n_1(h)$ и $\varphi_0(h)$. То есть функциональная зависимость хода педали $h = F(n_1, \varphi_0)$ полностью определяет скоростной и нагрузочный режим работы двигателя.

На рисунке 3 представлена принципиальная схема алгоритма управления энергосиловым блоком АТС, состоящего из карбюраторного ДВС и механической бесступенчатой передачи.

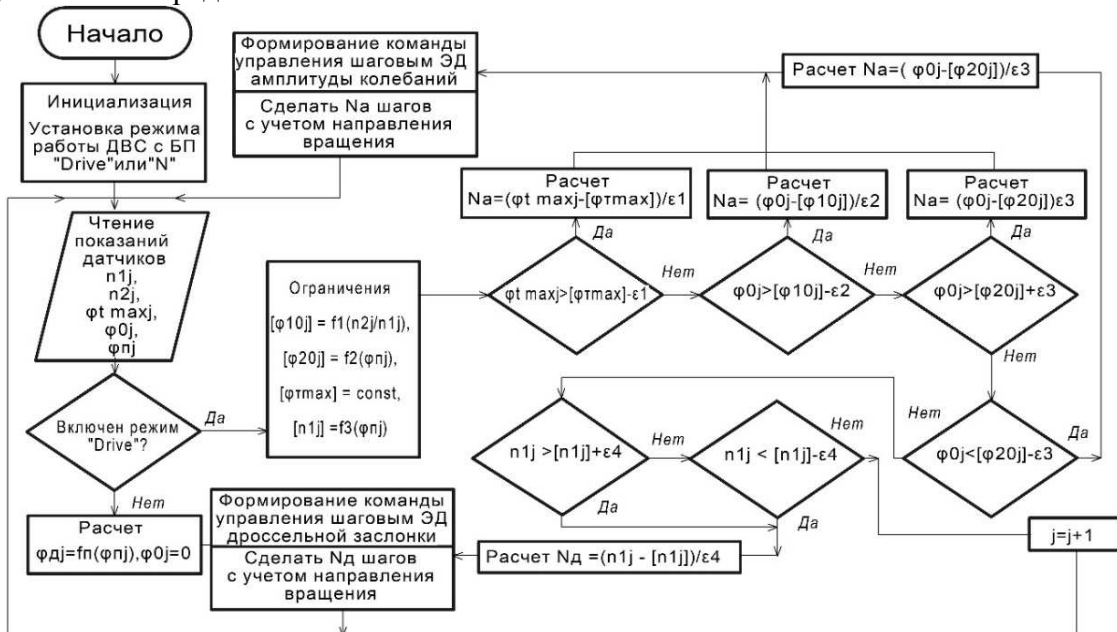


Рис. 3. Принципиальная схема алгоритма управления

На схеме приняты следующие обозначения: n_{1j} и n_{2j} – средние (здесь и далее индекс j относится к измерениям за один оборот вала двигателя) значения частоты вращения ведущего и ведомого вала передачи соответственно, измеренные датчиками; φ_{Tmaxj} – измеренное максимальное значение угла закручивания торсионного вала; φ_{0j} и φ_{nj} – среднее значение установленной амплитуды колебаний коромысел выпрямителей (устанавливается шаговым электродвигателем) и угла поворота педали управления соответственно; $\varphi_{0j} = f_n(\varphi_{nj})$ – функциональная зависимость угла поворота дроссельной

заслонки карбюратора (устанавливается шаговым электродвигателем привода) от угла поворота педали управления; $[\varphi_{10j}] = f_1(n_{2j}/n_{1j})$ – функциональная зависимость ограничений, накладываемых на амплитуду колебания (см. рис. 1а); $[\varphi_{20j}] = f_2(\varphi_{пj})$ – функциональная зависимость амплитуды колебаний от угла поворота педали управления; $[\varphi_{Tmax}]$ – допускаемый по условию прочности максимальный угол закручивания торсионного вала; $[n_{1j}] = f_3(\varphi_{пj})$ – функциональная зависимость частоты вращения ведущего вала передачи от угла поворота педали управления, загружаемая в память микроконтроллера; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ – допускаемые неточности измерений (зоны нечувствительности) соответствующих параметров; N_a и N_d количество шагов электродвигателей управления амплитудой колебаний и угла поворота дроссельной заслонки карбюратора двигателя соответственно.

Все функции, такие как, преобразование сигналов с датчиков и подсчет количества импульсов возложены на микроконтроллер ATMEGA 325. Обработка информации производится последовательно согласно управляющей программе, написанной на языке Assembler. Управление системой ДВС – бесступенчатая передача осуществляется от электронной педали «газа». Алгоритм реализуется микроконтроллером ATMEGA88PA.

Алгоритм предусматривает два режима работы системы управления: 1 режим «Нейтраль» запускается при включении зажигания ДВС – педалью управляется только дроссельная заслонка (машина стоит на месте, амплитуда колебаний коромысел выпрямителей равна нулю); 2 режим «Drive» запускается при включении соответственного тумблера – педалью управляется амплитуда колебаний и дроссельная заслонка в соответствии с зависимостями $[\varphi_{10j}] = f_1(n_{2j}/n_{1j})$, $[\varphi_{20j}] = f_2(\varphi_{пj})$ и $[n_{1j}] = f_3(\varphi_{пj})$. Только их сочетание обеспечивает поведение системы управления и выбирается потребителем в соответствии с заданным законом управления энергосиловым блоком и с учетом назначения АТС (городское, магистральное или специальное транспортное средство). Эти настройки определяются в соответствии с моделью нагружения ДВС.

Формирование команды управления шаговым двигателем на уменьшение амплитуды колебаний осуществляется при выполнении любого из условий: превышение допустимого угла закручивания торсиона по условию прочности $\varphi_{Tmaxj} > [\varphi_{Tmax}] - \varepsilon_1$ или превышение амплитуды колебаний коромысел заданным ограничениям $\varphi_{10j} > f_1(n_{2j}/n_{1j}) - \varepsilon_2$ или отклонению амплитуды колебаний коромысел в сторону увеличения от заданной педалью $\varphi_{20j} > f_2(\varphi_{пj}) + \varepsilon_3$. Команда управления двигателем на увеличение амплитуды колебаний формируется только при «отставании» фактической амплитуды от заданной педалью $\varphi_{20j} < f_2(\varphi_{пj}) - \varepsilon_3$ и отсутствии ограничений, уменьшающих амплитуду.

Формирование команды на управление дроссельной заслонкой карбюратора с учетом знака (увеличение или уменьшение) осуществляется при нарушении условия $f_3(\varphi_{пj}) - \varepsilon_4 < n_{1j} < f_3(\varphi_{пj}) + \varepsilon_4$. Стоит отметить, что поддержание частоты вращения вала двигателя в заданной педалью диапазоне осуществляется независимо от нагрузки. Для этого угол поворота дроссельной заслонки может изменяться в широком диапазоне и будет находиться согласно настройкам карбюратора в положении, соответствующем величине крутящего момента нагружающего двигатель. При работе системы в режиме «Нейтраль» частота вращения вала ДВС регулируется непосредственно водителем.

Функционирование алгоритма управления проверено при натуральных испытаниях ходового макета АТС УАЗ с бесступенчатой передачей Благонравова. Ходовой макет оснащен двигателем ЗМЗ 402 мощностью 69 кВт (95 л.с.). Масса ходового макета составила 1930 кг. Управление осуществлялось от одной педали. Полный ход $\varphi_{п}$ поделен между

управлением амплитудой $\varphi_{0j} = f_2(\varphi_{nj})$ и частотой вращения вала ДВС $n_{1j} = f_3(\varphi_{nj})$ в соотношении 50:50. Были приняты линейные зависимости функций $f_2(\varphi_{nj})$ и $f_3(\varphi_{nj})$ от угла поворота педали.

Сравнительные испытания бесступенчатой передачи и штатной коробки передач проведены только в одном элементарном городском цикле – разгоне до 15 км/час. Конечно, неправомерно оценивать повышение экономичности АТС, сравнивая результаты только в этом цикле [17]. Однако результаты испытаний показали, что расход топлива при использовании бесступенчатой передачи Благонравова и управлении энергосиловым блоком по разработанному алгоритму снижен на 23,5-28,4% (результаты 10 заездов) при среднем значении 25,5%.

Заключение

Разработаны новые технические решения, позволяющие обеспечить повышение экономичности использования АТС с поршневыми ДВС. Эти решения связаны с применением механической бесступенчатой передачи с разработанным и экспериментально проверенным алгоритмом эффективного управления. Полученные результаты позволят перейти к практической реализации нового типа энергоэффективной передачи, обеспечивающей улучшение технических показателей энергоустановок при снижении экологической нагрузки на природу.

Финансирование. Работа выполнена по государственному заданию Института машиноведения УрО РАН № 0391-2019-0001.

Список литературы

1. Nailiam N. Hailu, Daniel T. Redda. Design and Development of Power Transmission System for Green and Light Weight Vehicles: A Review // The Open Mechanical Engineering Journal. 2018, no. 12, pp. 81-94. doi.org/10.2174/1874-155X-0181-2-010-081.
2. Ehsani M., Gao Y., Emadi A. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design. – CRCpress, 2009.
3. Машков К.Ю., Наумов В.Н., Харитонов С.А., Чижов Д.А. Перспектива применения гибридной трансмиссии для мобильных роботов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Машиностроение”. – 2010. – №5. – С. 107-112.
4. Куликов И.А., Селифонов В.В., Филонов А.И. Поиск оптимального управления гибридной силовой установкой автомобиля по критерию баланса его экологических и топливноэкономических свойств // Известия МГТУ «МАМИ». – 2010. – №2(10). – С. 44-51.
5. Сысоева С. Топливная экономия, эффективность, экологичность — атрибуты новых автомобилей, двигателей и систем // Компоненты и технологии. – 2009. – №6. – С. 29-36.
6. Пинский Ф.И., Давтян Р.И., Черняк Б.Я. Микропроцессорные системы управления автомобильными двигателями внутреннего сгорания. – М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2004. – 136 с.
7. Кузнецов А.Г. Анализ возможности работы двигателя с минимальным расходом топлива // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – №7(664). – С. 52-58.
8. Петров В.А. Автоматическое управление бесступенчатых передач самоходных машин. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.
9. Благонравов А.А. Механические бесступенчатые передачи. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 202 с.
10. Благонравов А.А. Расчет внешней характеристики механического трансформатора с колебательным движением внутренних звеньев // Вестник машиностроения. – 2011. – №10. – С. 8-13.
11. Мальцев В.Ф. Механические импульсные передачи. – М.: Машиностроение, 1978. – 367с.
12. Yurkevich A.V., Tereshin A.V., Soldatkin V.A. Blagonravov continuously variable transmission: importance of internal force functions for torque transforming // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 971, p. 042018. DOI: 10.1088/1757-899X/971/4/042018.
13. Юркевич А.В., Терешин А.В., Солдаткин В.А. Экспериментальные характеристики механической бесступенчатой передачи с внутренними силовыми функциями // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, №4. – С. 310-319. – doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-310-319.
14. Благонравов А.А., Юркевич А.В. Оценка топливной экономичности трактора-погрузчика с механической бесступенчатой передачей // Механика машин, механизмов и материалов. – 2009. – №1. – С. 16-19.
15. Куликов И.А., Лежнев Л.Ю., Бахмутов С.В. Сравнительное исследование энергетической эффективности комбинированных энергоустановок, предназначенных для транспортных средств // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – №1. – С. 15-25. – doi.org/10.1134/S023-5711-9190-10-1-03.

16. Blagonravov A.A., Yurkevich A.B., Yurkevich A.A. Automatic control of a stepless mechanical transmission with an internal force function // Russian Engineering Research. 2017, vol. 37(3), pp.185-188. doi.org/10.3103/S106-8798-X170-30-0-54.
17. Юркевич А.В., Терешин А.В., Солдаткин В.А., Юркевич И.А. Сравнительные испытания на топливную экономичность автотранспортного средства оснащенного ДВС и механической бесступенчатой передачей. Краткое сообщение // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2019. – №17-1. – С. 69-73. – doi.org/10.26160/2474-5901-2019-17-69-73.

References

1. Hailemariam N. Hailu, Daniel T. Redda. Design and Development of Power Transmission System for Greenand Light Weight Vehicles: A Review // The Open Mechanical Engineering Journal. 2018, no. 12, pp. 81-94. doi.org/10.2174/1874-155X-0181-2-010-081.
2. Ehsani M., Gao Y., Emadi A. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design. – CRCpress, 2009.
3. Mashkov K.Yu., Naumov V.N., Kharitonov S.A., Chizhov D.A. The prospect of using hybrid transmission for mobile robots // Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series “Mechanical Engineering”. 2010, no. 5, pp. 107-112.
4. Kulikov I.A., Selifonov V.V., Filonov A.I. Search for optimal control of a hybrid power plant of a vehicle by the criterion of the balance of its environmental and fuel and economic properties // News of MSTU MAMI. 2010, no. 2(10), pp.44-51.
5. Sysoeva S. Fuel economy, efficiency, environmental friendliness - attributes of new cars, engines and systems // Components and technologies. 2009, no. 6, pp. 29-36
6. Pinsky F.I., Davtyan R.I., Chernyak B.Ya. Microprocessor control systems for automobile internal combustion engines. – М.: Legion-Avtodata, 2004. – 136 p.
7. Kuznetsov A.G. Analysis of the possibility of engine operation with minimum fuel consumption // News of higher educational institutions. Mechanical engineering. 2015, no. 7(664), pp. 52-58.
8. Petrov V.A. Automatic control of continuously variable transmissions of self-propelled machines. – М.: Mechanical Engineering, 1986. – 248 p.
9. Blagonravov A.A. Mechanical stepless gears. – Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2005. – 202 p.
10. Blagonravov A.A. Calculation of the external characteristics of a mechanical transformer with oscillatory motion of internal links // Bulletin of Mechanical Engineering. 2011, no. 10, pp.8-13.
11. Maltsev V.F. Mechanical impulse transmissions. – М.: Mechanical Engineering, 1978. – 367p.
12. Yurkevich A.V., Tereshin A.V., Soldatkin V.A. Blagonravov continuously variable transmission: importance of internal force functions for torque transforming // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 971, p. 042018. DOI: 10.1088/1757-899X/971/4/042018.
13. Yurkevich A.V., Tereshin A.V., Soldatkin V.A. Experimental Characteristics of Mechanical Continuously Variable Transmission with Internal Force Functions // Science and Technique. 2021, no. 20(4), pp. 310-319. doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-310-319.
14. Blagonravov A.A., Yurkevich A.V. Evaluation of the fuel efficiency of a tractor-loader with a mechanical continuously variable transmission // Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials. 2009, no. 1, pp. 16-19.
15. Kulikov I.A., Lezhnev L.Yu., Bakhmutov S.V. Comparative study of the energy efficiency of combined power plants designed for vehicles // Problems of mechanical engineering and reliability of machines. 2019, no. 1, pp. 15-25. doi.org/10.1134/S023-5711-9190-10-1-03.
16. Blagonravov A.A., Yurkevich A.B., Yurkevich A.A. Automatic control of a stepless mechanical transmission with an internal force function // Russian Engineering Research. 2017, vol. 37(3), pp.185-188. doi.org/10.3103/S106-8798-X170-30-0-54.
17. Yurkevich A.V., Tereshin A.V., Soldatkin V.A., Yurkevich I.A. Comparative tests on fuel efficiency of a vehicle equipped with an ice and a mechanical variable transmission. Brief notes // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2019, no. 17-1, pp. 69-73. doi.org/10.26160/2474-5901-2019-17-69-73.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Терентьев Александр Борисович – ведущий инженер	Terentiev Alexander Borisovich – lead engineer
Юркевич Андрей Владиленович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник	Yurkevich Andrey Vladilenovich – candidate of technical science, associate professor, senior researcher
Солдаткин Владислав Александрович – инженер	Soldatkin Vladislav Alexandrovich – engineer
Терешин Алексей Валерьевич – инженер	Tereshin Aleksey Valerievich – engineer
urkeva@mail.ru	

Получена 24.11.2022