

УДК 629.113+624.431

КОМБИНИРОВАННАЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТИПА: ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

И.А. Куликов / В.В. Селифонов, к.т.н., проф.
МГТУ «МАМИ»

В рамках проектов по исследованию и созданию автомобильных комбинированных энергоустановок (КЭУ), которые проводятся научно-образовательным центром при кафедре «Автомобили» МГТУ «МАМИ» совместно с ФГУП НПП «КВАНТ», была разработана схема КЭУ, названная последовательно-параллельной [1]. В 2010 г. данная КЭУ в заднеприводном исполнении была реализована на экспериментальном гибридном автомобиле, который создавался в ходе совместных опытно-конструкторских работ ФГУП «НАМИ» и МГТУ «МАМИ». В настоящее время в МАМИ ведутся работы по адаптации КЭУ последовательно-параллельного типа на полноприводном автомобиле.

Как следует из названия, последовательно-параллельная схема сочетает в себе конструктивные и функциональные признаки двух типов КЭУ — последовательного и параллельного. Её полноприводное исполнение схематично представлено на рис. 1. Для реализации такой КЭУ требуются две обратимые электрические машины (ЭМ1 и ЭМ2). Первая электрическая машина (проходного типа) механически связана с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Сочетание ДВС и ЭМ1 можно условно назвать двигатель-генераторной установкой (ДГУ). ДГУ соединена с задними колесами автомобиля механической трансмиссией с возможностью разрыва потока мощности, который осуществляется с помощью электромагнитной муфты. Вторая электрическая машина постоянно соединена с приводом передних колес автомобиля.

Движение в режиме электромобиля осуществляется при помощи ЭМ2. Муфта в это время выключена. Если тяги одной электрической машины недостаточно или по условиям движения требуется использование полного привода, то муфта замыкается и включается ЭМ1. Две электрические машины обеспечивают автомобилю тяговые характеристики, сравнимые с характеристиками базового «негибридного» автомобиля. Это позволяет не использовать в КЭУ для увеличения момента коробки передач. Если при включенной муфте частота вращения вала ДВС превышает частоту холостого хода, то КЭУ может быть переведена в параллельный режим, в котором тяга на

задних колесах создается двигателем внутреннего сгорания, а ЭМ1 и, если необходимо, ЭМ2 работают либо в качестве генераторов, заряжая батареи от ДВС, либо в качестве моторов, помогая ДВС. Когда обе электрические машины выключены, ДВС работает как в обычном автомобиле при движении на прямой передаче. Если скорость автомобиля не позволяет КЭУ работать в параллельном режиме (механически связанный с колесами ДВС не может достичь частоты устойчивой работы), а использовать ДВС необходимо (например, при длительном движении в подъем с малой скоростью, для которого заряда батарей может не хватить, или при низком уровне заряда батарей), то можно задействовать последовательный режим. Муфта при этом разомкнута, ЭМ2 работает как тяговая машина, а ДВС и ЭМ1 — как двигатель-генераторная установка, питающая электричеством ЭМ2 и, при избытке мощности ДВС, восполняющая заряд в батареях. ЭМ2 обладает тяговой характеристикой, достаточной для обеспечения движения автомобиля по ровной дороге и на небольших подъемах в широком диапазоне скоростей. Поэтому последовательный режим может быть использован не только на малой скорости, но и на скорости, при которой уже можно работать в параллельном режиме. Это целесообразно в том случае, если последовательный режим обеспечивает лучшие экологические и топливно-экономические характеристики автомобиля, чем параллельный.

На начальном этапе работ по созданию гибридного автомобиля требуется теоретически оценить свойства, которые дает автомобилю КЭУ с выбранным компонентным составом. Целью работы являлось определение потенциала создаваемой КЭУ с точки зрения энергоэффективности (или топливной экономичности) и экологических характеристик.

Для теоретического исследования используется математическая модель автомобиля с КЭУ. В ее состав входят модели динамических процессов, представляющие собой дифференциальные уравнения, и модели компонентов КЭУ. Последние представляют собой таблично заданные характеристики, отражающие те свойства компонентов, которые существенны для оценки энергоэффективности КЭУ и ее влияния на экологию. Для электрических компонентов это характеристики КПД, а для ДВС — многопараметровые характеристики, которые являются зависимостями удельных выбросов вредных веществ и удельного расхода топлива от режима работы двигателя, задаваемого частотой вращения его вала и топливоподачей (или нагрузкой).

КЭУ является системой со сложным энергообменом. Часть энергии, вырабатываемой ДВС, через трансмиссию (механическую или электромеханическую) передается автомобилю для движения или изменения скорости, другая часть забирается генератором и отправляется в батареи для временного хранения. Если мощности ДВС недостаточно для движения или ДВС не работает, то энергия забирается из батарей тяговым электроприводом. Если требуется уменьшить кинетическую энергию автомобиля (снизить его скорость), то электромашина, работая в режиме генератора, забирает эту энергию и отправляет в батареи. Таким образом энергия в КЭУ передается несколькими путями и между несколькими накопителями: топливный бак, батареи, автомобиль (который является аккумулятором кинетической энергии).

Наличие в КЭУ буферного накопителя (батарей) позволяет относительно свободно управлять энергопотоками и, следовательно, режимами работы компонентов энергоустановки. Дополнительную свободу выбора рабочей точки ДВС дает наличие бесступенчатой передачи (в случае последовательно-параллельной схемы — она электрическая). Неизбежно возникает вопрос, какие именно режимы работы выбирать. Ответ на него, очевидно, диктуется целью «гибридизации» автомобиля: надо выбирать такое управление, которое обеспечивает автомобилю наилучшую топливную экономичность, или минимальные вредные выбросы, или минимальный расход топлива при заданном экологическом классе. Для снижения расхода топлива необходимо управлять энергоустановкой так, чтобы ее КПД (а не КПД отдельного агрегата, например ДВС) был максимальным, но при этом обеспечивался баланс энергии в батареях. Получе-

ние высокого экологического класса, напротив, требует сосредоточения внимания на выборе режима работы только одного агрегата — ДВС. Таким образом, экология и энергоэффективность могут оказаться в противоречии друг другу, особенно в связи с тем, что минимумы удельных расходов не всегда совпадают с минимальными выбросами нормируемых вредных веществ.

Задача управления КЭУ осложняется еще и тем, что ее компоненты имеют многомерные, нелинейные характеристики КПД. То же самое можно сказать и о характеристиках вредных выбросов теплового двигателя. Создание стратегии управления столь сложным объектом путем применения субъективных решений (на основе научно-инженерного опыта и вычислительных экспериментов) может не привести к полной реализации потенциала КЭУ (возможно, не обеспечит требуемый экологический класс автомобиля).

Уже более года в теоретических исследованиях КЭУ на кафедре «Автомобили» МГТУ «МАМИ» используется математический метод поиска управлений, называемый динамическим программированием (ДП) [2, 3, 4]. Опыт его применения показал, что программирование позволяет выявить потенциал КЭУ и оценить ее свойства уже на начальном этапе исследований, когда еще не разработано даже приблизительной стратегии управления энергоустановкой. ДП рассчитывает управление, которое называется оптимальным. Оно не является готовой стратегией управления, а представляет собой свойство исследуемой системы. В дальнейшем его можно анализировать математическими методами и создавать на основе результатов анализа реальную систему управления. Программа, работающая по алгоритму ДП, была адаптирована для математической модели КЭУ последовательно-параллельного типа в полноприводном исполнении. Проведены поиски оптимального управления с разными критериями (энергоэффективность, экология, сбалансированные свойства).

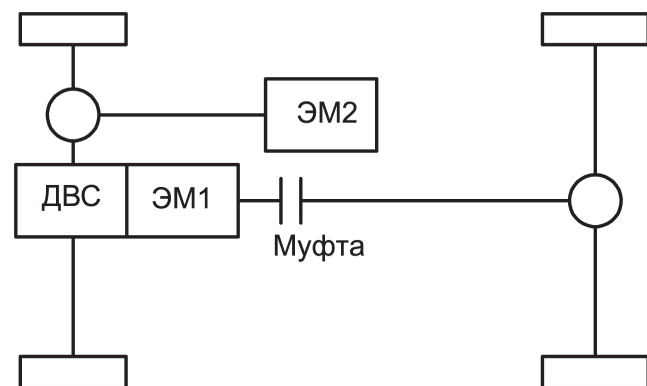


Рисунок 1. Схема КЭУ последовательно-параллельного типа в полноприводном исполнении

Таблица 1. Путевые расходы топлива и выбросы вредных веществ, полученные в результате моделирования и поиска управлений методом динамического программирования

Показатели	α	β	γ	Qs, л/100км, % Баз.	CH ¹ , г/км, % Баз.	CO ¹ , г/км, % Баз.	NO _x , г/км, % Баз.	PM ² , г/км, % Баз.
Баз.	-	-	-	10.51	0.127	0.485	0.657	0.00345
% Баз.	-	-	-	100%	100%	100%	100%	100%
КЭУ	1	0	0	7.03	0.017	0.158	1.187	0.0032
% Баз.	1	0	0	33.1%	86.3%	67.4%	-80.6%	7.5%
КЭУ	1	500	0	7.60	0.045	0.181	0.332	0.0046
% Баз.	1	500	0	27.7%	64.6%	62.8%	49.5%	-33.3%
КЭУ	1	3000	0	8.34	0.053	0.269	0.322	0.0035
КЭУ	1	3000	0	20.7%	58.2%	44.5%	51.0%	-1.7%
КЭУ	1	5000	0	8.30	0.053	0.267	0.319	0.00355
% Баз.	1	5000	0	21.1%	58.3%	44.9%	51.4%	-3.0%
КЭУ	1	5000	3000	8.41	0.056	0.285	0.319	0.0028
% Баз.	1	5000	3000	20.0%	55.8%	41.3%	51.5%	18.5%
КЭУ	0.1	10000	0	8.40	0.053	0.275	0.318	0.0035
% Баз.	0.1	10000	0	20.1%	58.0%	43.3%	51.7%	-1.5%

¹ С учётом использования двухкомпонентного нейтрализатора. ² С учётом использования фильтра твёрдых частиц

Объектом проведенных теоретических исследований являлся автомобиль УАЗ–пикап. В странах, использующих Правила ЕЭК ООН в качестве нормативных документов, в том числе и в Российской Федерации, для оценки экологических и энергетических свойств гибридных автомобилей полной массой до 3,5 т используются Правила № 83 и № 101. Выбросы CO, NO_x, CH и CO₂, а также расход топлива в соответствии с этими Правилами определяются в ездовом цикле, который состоит из городской и загородной частей. Масса автомобиля при испытаниях должна быть равна его снаряженной массе плюс 100 кг. При поиске управления КЭУ с помощью математической модели воспроизводились эти условия испытаний.

Одним из ограничений области поиска управлений связано с обеспечением баланса энергии в батареях. Это означает, что уровень заряда батарей (он часто обозначается англоязычной аббревиатурой SOC — State Of Charge) в начале и в конце цикла должен быть одинаковым. Этим достигается адекватность оценок расхода топлива и выбросов вредных веществ [2].

Целевая функция, которую должен минимизировать алгоритм ДП, представляет собой взвешенную сумму израсходованного топлива и выбросов вредных веществ за весь цикл:

$$F = \sum \alpha Q(t) + \sum \beta mNO_x(t) + \sum \gamma PM(t) + \sum \lambda mCO(t) + \sum \tau mCH(t),$$

где Q — масса топлива; m — масса выбросов компонента отработавших газов; α , β , γ , λ , τ — весовые коэффициенты.

Показатели, полученные в результате поиска оптимального управления КЭУ, сравнивались с соответствующими цифрами, рассчитанными для базового «негибридного» автомобиля с помощью математического моделирования его движения в том же цикле и с той же загрузкой. Значения путевых расходов топлива и выбросов вредных веществ для базового автомобиля и для различных вариантов управления КЭУ гибридного автомобиля, полученных изменением целевой функции, представлены в табл. 1.

Первый поиск управления с помощью ДП проводился только с одним критерием — минимальным расходом топлива в цикле. Найденное управление обеспечивает гибриднему автомобилю существенную экономию топлива по сравнению с базовым (33.1% — строку с коэффициентами $\alpha = 1$, $\beta = \gamma = 0$). Полученное снижение выбросов углеродосодержащих компонентов отработавших газов (CH и CO) сравнимо с эффектом использования системы нейтрализации (86.3% и 67.4% соответственно). По твердым частицам (в качестве ДВС используется дизель) не было достигнуто значительного улучшения (снижение на 7.5%). А оксиды азота вообще можно назвать «критическим» компонентом: их выброс в 1.8 раза больше, чем у базового автомобиля, что «отбрасывает» гибрид в 1-й экологический класс (базовый автомобиль соответствует 3-му классу). Такое ухудшение показателя NO_x объясняется тем, что, добиваясь наилучшей топливной экономичности, алгоритм ДП использует высокую загрузку ДВС. В этой рабочей области двигатель имеет наименьшие удельные расходы топлива и выбросы углеродосодержащих веществ, однако

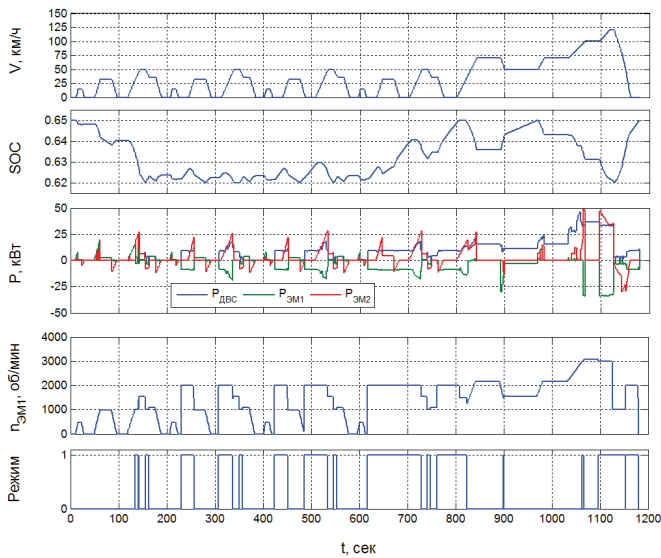


Рисунок 2. Основные показатели работы КЭУ при «сбалансированном» варианте управления: P — мощность; n — частота вращения вала. Режим: 0 — параллельный; 1 — последовательный

удельные выбросы NO_x и PM с повышением загрузки существенно возрастают.

Для получения баланса топливно-экономических и экологических характеристик гибридного автомобиля, а также для повышения его экологического класса (относительно базового автомобиля), были проведены поиски оптимального управления КЭУ с различными весовыми коэффициентами для массы топлива, NO_x и PM (слагаемые для углеродосодержащих веществ были исключены из целевой функции, поскольку минимизация их выбросов практически совпадает с минимизацией расхода топлива). Наилучшие показатели были получены при $\alpha = 1$, $\beta = 5000$, $\gamma = 3000$ (этот вариант управления можно назвать «сбалансированным»). Экономия топлива в этом случае остается значительной (20%), а по всем вредным выбросам достигается существенное снижение по сравнению с вредными выбросами базовым автомобилем. Полученные показатели обеспечивают гибриднему автомобилю 5-й экологический класс (только выбросы NO_x на 2.9% превышают требуемое значение 5-го класса).

В качестве примера оптимального управления, найденного ДП, на рис. 2 приведены графики, которые характеризуют работу КЭУ при «сбалансированном» варианте управления. На графиках показано, что возможность выбора между последовательным и параллельным режимами КЭУ используется весьма активно. В городской части цикла применяется преимущественно последовательный режим. Очевидно, что это связано с переменным характером движения и малой величиной сил сопротивления. Кроме того, отмечается зарядка батарей при стоянке автомобиля (на участке 620...800 сек

и в конце цикла). Параллельный режим используется в основном в загородной части цикла, причем с минимальным участием электромашин

Выводы

Теоретическое исследование свойств КЭУ последовательно-параллельного типа показало, что эта энергоустановка может обеспечить автомобилю значительное улучшение топливной экономичности и снижение вредного влияния на окружающую среду. Существенные резервы энергоэффективности и экологичности данной КЭУ дают разработчикам множество возможных путей управления ею. Наиболее эффективные пути могут быть найдены с помощью средств поиска управлений, независимых от субъективных решений. Проведенная работа показала использование метода теории оптимального управления, называемого динамическим программированием, в качестве такого средства. Выбор конкретного пути управления зависит от цели использования КЭУ в автомобиле. Исследование доказало, что КЭУ последовательно-параллельного типа может повысить экологический класс автомобиля на две ступени, одновременно обеспечивая существенную экономию топлива (в сравнении с автомобилем, на базе которого создана). Такое управление можно назвать экологическим. Для потребителей, заинтересованных, прежде всего, в экономических преимуществах гибридных автомобилей, можно предложить управление, которое достигает максимальной экономии топлива при обеспечении обязательных на данный момент экологических требований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаенко А.В., Бахмутов С.В., Селифонов В.В., Павлушков Б.Э., Филонов А.И., Благушко Я.В., Баулина Е.Е., Куликов И.А., Карпухин К.Е., Данилин М.Ф. Комбинированная энергетическая установка транспортного средства (варианты) // Патент на изобретение РФ № 2009141549. 27.07.2011 г.
2. Куликов И.А. Динамическое программирование как инструмент теоретического исследования силовой установки гибридного автомобиля // Журнал автомобильных инженеров. 2010 г. — № 4 (63), № 5 (64).
3. Куликов И.А., Селифонов В.В., Филонов А.И. Поиск оптимального управления гибридной силовой установкой автомобиля по критерию баланса его экологических и топливно-экономических свойств // Известия МГТУ «МАМИ». — 2010 г. — № 2 (10).
4. Куликов И.А., Селифонов В.В., Филонов А.И. Управление комбинированной энергоустановкой автомобиля: экология или энергоэффективность // Автомобильная промышленность. 2011 г. — № 1.