

совой устойчивостью при прямолинейном движении.

Приведенные в статье материалы получены при выполнении научно-исследовательских работ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Выводы

Таким образом, можно сделать выводы, что величина уширения следа и сдвига грунта в боковом направлении, влияющая на разрушение грунта, зависит не только от параметров движения автомобиля на повороте (таких как скорость движения и радиуса поворота), но и конструкции самого автомобиля. Особенно это касается схемы рулевого управления автомобиля, расположения осей у многоосных автомобилей, типа применяемых шин, т.е. параметров, влияющих на формирование следа после прохода автомобиля.

Рассмотренные схемы рулевого управления и расположение осей многоосных автомобилей позволяют сделать следующие выводы:

- для снижения разрушающего воздействия на грунт при криволинейном движении автомобиля расположение осей должно быть равномерным или максимально приближенным к равномерному;
- применение схемы рулевого управления по типу 4 (с управляемыми передней и задней осями), можно добиться снижения разрушения грунта в среднем на 10-15%, а при применении схемы с всеколесным рулевым управлением можно добиться формирования следа с минимальным уширением, который будет приближаться к ширине следа при прямолинейном движении автомобиля.
- правильный подбор режимов движения автомобиля на повороте и конструкционных параметров автомобиля позволяет добиться снижения разрушающего воздействия на грунт на 25-30%.

Литература

1. Пирковский Ю.В., Шухман С.Б. Теория движения полноприводного автомобиля. Прикладные вопросы оптимизации конструкции шасси. М., 2001.
2. РД 37.083.002-2004 Разрушающее воздействие полноприводного автомобиля на грунт. Критерии оценки. Методы определения.
3. Русанов В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути её решения, М.: ВИМ, 1998.
4. Шухман С.Б., Переладов А.С. Оценка воздействия движителей автомобиля на почву // Автомобильная промышленность, 2002. № 6. с. 16-19.

Поиск оптимального управления гибридной силовой установкой автомобиля по критерию баланса его экологических и топливно-экономических свойств

Куликов И.А., к.т.н. проф. Селифонов В.В., Филонов А.И.
МГТУ «МАМИ»
(495) 223-05-23, доб. 1587

Аннотация. Гибридная силовая установка (ГСУ) автомобиля позволяет управлять режимной точкой двигателя внутреннего сгорания (ДВС) независимо от скорости автомобиля и мощности, требуемой для движения. Это свойство дает гибриднему автомобилю существенный потенциал улучшения топливно-экономических и экологических свойств по сравнению с базовым негибридным автомобилем. ГСУ представляет собой многокомпонентную систему с многомерными нелинейными характеристиками, поэтому для наиболее полной реализации ее потенциала при исследовании ГСУ и разработке стратегии управления ею целесообразно использовать методы математического поиска оптимальных управлений. Опыт исследований ГСУ показывает, что наиболее подходящим методом является динамическое программирование (ДП). Программа поиска оптимального

управления ГСУ по алгоритму ДП была разработана и реализована в среде MATLAB/Simulink. Серия прогонов программы позволила выявить обратную зависимость между расходом топлива ДВС и выбросами окислов азота NO_x . Был проведен анализ результатов поисков оптимального управления и предложены пути получения сбалансированных экологических и топливно-экономических характеристик автомобиля.

Ключевые слова: гибридная силовая установка, оптимальное управление, критерий баланса экологических и топливно-экономических свойств.

Введение

Экологические характеристики автомобиля зависят в основном от системы управления рабочими процессами двигателя и эффективности системы нейтрализации отработавших газов. Однако она важна не только для экологических, но и для топливно-экономических свойств автомобиля. Характеристика работы двигателя – его режимная точка – обычно не может произвольно задаваться системой управления. Режимная точка (РТ) двигателя – это сочетание частоты вращения его вала и развиваемой им мощности. РТ в значительной мере определяет КПД двигателя и концентрацию вредных веществ в отработавших газах. В большинстве автомобилей она напрямую связана с режимом движения и задается водителем, который, оперируя педалью акселератора, управляет скоростью автомобиля и мощностью двигателя. Таким образом, система управления двигателем вынуждена оптимизировать смесеобразование в режиме работы, который «навязан» ей водителем.

В случае гибридного автомобиля ситуация существенно меняется. Устройство и принцип работы гибридной силовой установки (ГСУ) любого типа позволяют выбирать РТ двигателя внутреннего сгорания (ДВС) независимо от задаваемого водителем характера движения автомобиля. Степень этой независимости определяется двумя факторами. Первый – это тип трансмиссии, используемой в ГСУ. Применение бесступенчатой передачи (электрической, электромеханической или механической) позволяет выбрать практически любую РТ из рабочего диапазона ДВС. В негибридных автомобилях, оснащенных бесступенчатыми передачами и не связанным с педалью акселератора автоматическим управлением топливоподачей, режимная точка ДВС также может быть выбрана свободно по частоте двигателя, но с условием обеспечения мощности, которая требуется для движения автомобиля. ГСУ не имеет этого ограничения: ДВС в ней может развивать мощность большую, чем требуется на колесах, – избыток мощности будет использован генератором для зарядки батарей; в случае же недостатка мощности ДВС электромотор создает дополнительное тяговое усилие. В обоих случаях батареи работают как энергетический буфер, забирая излишек энергии или обеспечивая электрическую тягу. Они же являются вторым фактором ограничения свободы выбора РТ: время от времени ДВС *должен* вырабатывать избыточную мощность или выключаться, чтобы поддерживать уровень заряда батарей в заданном диапазоне.

Итак, в ГСУ свобода выбора режимной точки ДВС может использоваться как эффективный и гибкий инструмент для формирования экологических характеристик автомобиля наряду с регулированием смесеобразования ДВС и нейтрализацией, а также для повышения энергоэффективности самой ГСУ. Создание стратегии управления ГСУ, позволяющей сбалансировать экологические и топливно-экономические свойства автомобиля с помощью этого инструмента, является задачей описываемого в этой статье исследования. Фактически это задача поиска режимных точек компонентов ГСУ, которые обеспечивают приемлемые сочетания свойств автомобиля. В теоретическом исследовании ДВС моделируется с помощью набора его многопараметровых характеристик, которые содержат данные о вредных выбросах и расходе топлива двигателем в ряде его режимных точек. Модели электрических компонентов ГСУ представляются в виде их характеристик КПД. Перечисленные характеристики отличаются высокой нелинейностью и многомерностью. Кроме того, задача усложняется тем, что ГСУ является динамическим объектом, состояние которого меняется в зависимости от режима движения автомобиля. Очевидно, что при таких условиях распространенный под-

ход создания стратегий управления ГСУ – на основе эвристических правил и законов управления – не может использоваться как единственный или основной, потому что субъективные оценки и решения, на которых строится этот подход, могут не привести к полному раскрытию потенциала энергоэффективности и экологической безопасности столь сложной системы. Для этого необходим математический инструмент поиска управления ГСУ. Наиболее подходящим с точки зрения специфики задачи, а также с точки зрения реализации на ЭВМ является метод теории оптимального управления, называемый динамическим программированием (ДП). На кафедре «Автомобили» МГТУ «МАМИ» уже имеется определенный опыт использования этого метода: программа поиска оптимального по критерию энергоэффективности управления ГСУ на основе ДП была создана в рамках работ с экспериментальным гибридным автомобилем «МАМИ». Для решения задачи, поставленной выше, использовалась та же программа с несколькими изменениями: математическая модель была дополнена характеристиками вредных выбросов ДВС и параметрами системы нейтрализации; в целевую функцию помимо расхода топлива были включены массы вредных выбросов.

Динамическое программирование

Задача оптимального управления заключается в том, чтобы перевести модель исследуемой системы из начального состояния в конечное, руководствуясь определенным критерием качества. Для поиска сбалансированного сочетания экологических и топливно-экономических характеристик гибридного автомобиля целесообразно использовать критерий качества, представляющий собой целевую функцию F в виде взвешенной суммы массы израсходованного за время движения топлива и масс вредных веществ в отработавших газах:

$$F = \sum_{t=0}^{N-1} L(x(t), u(t)) = \sum_{t=0}^{N-1} Q(t) + \sum_{t=0}^{N-1} \alpha \cdot mNO_x(t) + \sum_{t=0}^{N-1} \beta \cdot mCH(t) + \sum_{t=0}^{N-1} \gamma \cdot mCO(t),$$

где t – шаг по времени дискретной модели исследуемой системы; N – длительность движения, измеренная в шагах по времени; x – вектор переменных состояния модели; u – вектор переменных управления; Q – масса топлива, израсходованного на текущем шаге; m – массовый расход компонента отработавших газов на текущем шаге; α, β, γ – весовые коэффициенты для вредных веществ.

Состояние x модели ГСУ характеризуется одной переменной – степенью зарядки батарей, которая часто обозначается английской аббревиатурой SOC (State of charge). В качестве управления u , которое изменяет состояние системы, удобно использовать мощность электрической машины.

Поиск управления методом динамического программирования основан на принципе оптимальности, который был сформулирован создателем ДП Р. Беллманом [1], [2]: *оптимальное управление в любой момент времени не зависит от предыдущих состояний системы и определяется только ее текущим состоянием и целью управления.*

Из принципа оптимальности следует, что в каждом состоянии системы управление должно выбираться, во-первых, без учета прошлых состояний, а во-вторых, таким образом, чтобы последовательность состояний, начинающаяся с текущего и заканчивающегося последним, привела систему к цели управления (которая определяется критерием качества). Это можно назвать принципом дальновидного планирования. В случае дискретной задачи каждый шаг планируется с учетом всех будущих шагов.

Есть один шаг, который можно планировать без учета будущего. Очевидно, что это последний шаг. Управление на нем можно выбрать так, чтобы достичь минимума целевой функции на этом шаге. Согласно принципу оптимальности, на предпоследнем шаге управление должно быть таким, чтобы вместе с последним шагом (на котором управление уже выбрано) достичь минимума целевой функции. Шаг, предшествующий предпоследнему, должен учитывать результаты предпоследнего и последнего шагов, вместе взятых. Таким образом, принцип оптимальности реализуется при разворачивании процесса от конца к началу.

Программа поиска оптимального управления ГСУ методом ДП была реализована в системе MATLAB/Simulink.

Объект исследования и условия поиска управления ГСУ

Описываемое в данной статье исследование представляет собой исключительно теоретическую работу и пока не связано с каким-либо реальным проектом. Поэтому и объект исследования является лишь абстрактной моделью автомобиля. Для согласования с общим направлением работ по ГСУ, которые проводятся в «МАМИ», характеристики автомобиля соответствуют городскому развозному грузовику малого класса. В базовом и в гибридном варианте автомобиля используется один и тот же ДВС – бензиновый двигатель с максимальной мощностью 100 кВт, многопараметровые характеристики которого были получены ранее в результате стендовых испытаний. Гибридный вариант автомобиля реализуется по параллельной схеме, разработанной для экспериментального автомобиля «МАМИ» [3] (рисунок 1). Для моделирования дополнительного преобразователя энергии (ЭМ на рисунке 1) используются характеристики обратимой электрической машины с пиковой мощностью 65 кВт и длительной мощностью 30 кВт.

Поиск оптимального управления проводился исключительно для городских условий движения. Для их имитации использовался европейский городской цикл ECE15. В качестве одного из ограничений области поиска управления ГСУ было задано условие равенства уровней заряда батарей в начале и в конце цикла. Это условие обычно называется обеспечением баланса энергии в накопителе. Специфика использования энергии в ГСУ такова, что при моделировании и стендовых испытаниях по циклу только отсутствие дисбаланса заряда в конце цикла гарантирует достоверное определение топливно-экономических или экологических характеристик гибридного автомобиля.

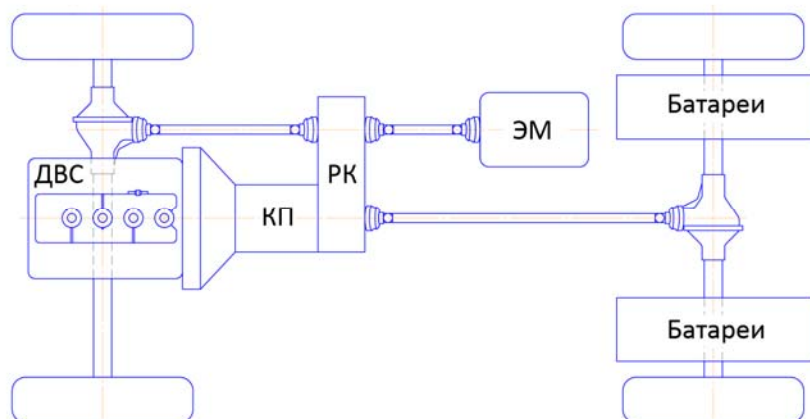


Рисунок 1 – Схема гибридной силовой установки экспериментального автомобиля «МАМИ»

Одно существенное упрощение модели, признанное на начальном этапе исследований допустимым, было принято относительно работы нейтрализатора. Это упрощение состоит в том, что эффективность нейтрализации считается постоянной и оптимальной на всем протяжении цикла как для базового (негибридного) автомобиля, так и для гибрида.

Результаты поиска управления ГСУ

Экологический класс присваивается автомобилю исходя из результатов испытаний, описанных в Правилах 83 ЕЭК ООН. Одним из этих испытаний является ездовой цикл, состоящий из четырех элементарных городских циклов и одного загородного. В данном исследовании использован только элементарный городской цикл ECE15 Правил 83 и, конечно, неправомерно оценивать экологический класс автомобиля даже теоретически, сравнивая расчетные значения вредных выбросов только в этом цикле с пороговыми значениями, которые устанавливаются стандартом. Однако первые же результаты моделирования показали, что эмиссия окислов азота в одном только цикле ECE15 численно сопоставима с пределами норм, из чего можно сделать предположение, что выбросы NO_x именно в городском цикле могут в существенной мере определять экологический класс автомобиля. Поэтому в процессе поиска оптимального управления ГСУ предельные значения норм Евро по NO_x использо-

вались в качестве ориентиров.

В первом поиске управления ГСУ алгоритм ДП был ориентирован на достижение наилучшей топливной экономичности. Для этого в целевой функции все коэффициенты при массах вредных выбросов были приравнены нулю. Некоторые результаты поиска показаны на рисунке 2а. На нем сверху вниз расположены графики скорости автомобиля, мощностей, развиваемых силовыми агрегатами ГСУ, и состояния заряда батареи SOC. На графике мощностей P_e ДП означает мощность ДВС, полученную в результате работы алгоритма поиска, $P_{e\text{всх}}$ – это максимальная мощность ДВС при той же частоте n_e , что и P_e ДП (по соотношению этих мощностей удобно определять загрузку двигателя), $P_{эм}$ соответствует мощности электромашины. Анализ полученных результатов показывает, что для снижения путевого расхода топлива ДП использует такие сочетания режимных точек компонентов ГСУ, при которых достигается максимальный КПД *всей силовой установки*, а не ее отдельных агрегатов. В «жертву» может быть принесена даже эффективность работы ДВС – агрегата, который собственно и расходует топливо. Объясняется это следующим образом. Двигатель внутреннего сгорания эффективнее всего использует энергию топлива для развития заданной мощности, если он работает с нагрузкой, близкой к максимальной. В исследуемой схеме силовой установки ДВС нагружается силами сопротивления движению и электрогенератором. Их совместное воздействие определяет мощность, развиваемую ДВС.

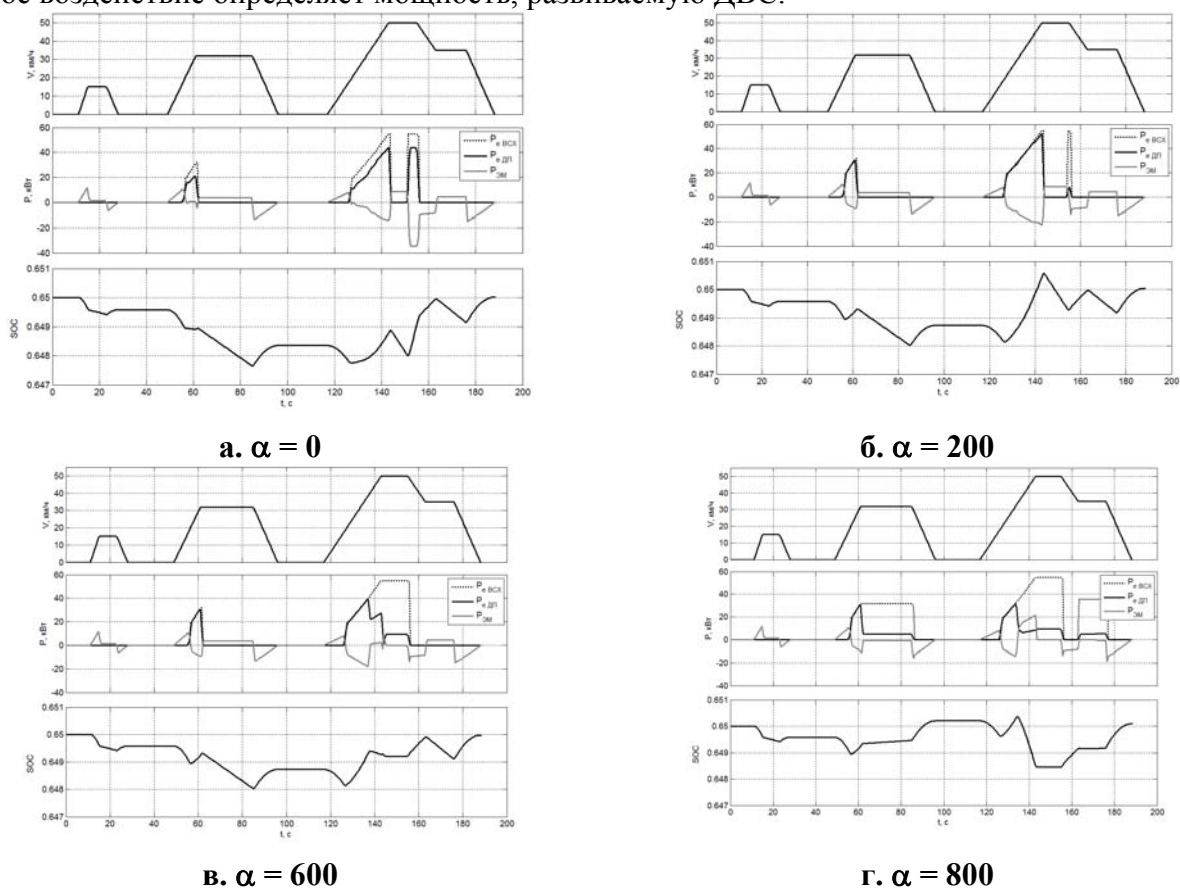


Рисунок 2 – «Эволюция» оптимального управления ГСУ, обусловленная изменением веса NO_x (коэффициент α) в целевой функции

Соответственно, существует два пути передачи энергии от ДВС к колесам автомобиля: только через механическую трансмиссию и через электромеханическую трансмиссию, причем не сразу, а с задержкой энергии в накопителе на некоторое время. Очевидно, что первый путь намного эффективнее второго. Однако именно наличие второго пути позволяет относительно свободно выбирать режимную точку ДВС, а также сохранять часть выработанной им энергии для движения на электрической тяге. Если автомобиль движется с постоянной (или почти постоянной) скоростью или с умеренным ускорением, то нагрузка на ДВС от сил сопротивления невелика и недостаточна для вывода РТ двигателя в область максимальных

КПД. Чтобы этого добиться, необходимо генератором создать значительный догружающий момент. При этом большая часть мощности ДВС отправится к колесам неэффективным электрическим путем. Кроме того, в некоторых случаях увеличение КПД теплового двигателя путем изменения его РТ может повлечь уменьшение КПД генератора, поскольку их режимы работы связаны; кинематическая связь обусловлена общей трансмиссией, а силовая – необходимостью обеспечивать мощность на колесах, задаваемую водителем. Таким образом, неэффективное использование энергии, выработанной двигателем, может свести на нет повышение его КПД. Именно поэтому задачей энергоэффективного управления (единственный приоритет которого – топливная экономичность) является поиск оптимальных сочетаний КПД всех компонентов ГСУ.

Расчетные выбросы СН и СО, полученные в результате первого запуска ДП для гибридного автомобиля, значительно ниже, чем у базового (на 41% и 30% соответственно). И у обоих автомобилей эти выбросы существенно меньше пороговых значений норм Евро-5. Напротив, по NO_x ГСУ не дает почти никакого выигрыша (около 3%), и у обоих автомобилей выбросы окислов азота удовлетворяют только норме Евро-3. Поэтому условно в качестве критических компонентов отработавших газов были приняты NO_x , и дальнейший поиск оптимальных управлений проводился с целью минимизации и расхода топлива и выбросов NO_x . Для этого коэффициенту α присваивались значения из следующего ряда: 50, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500. Весовые коэффициенты для остальных выбросов были оставлены нулевыми.

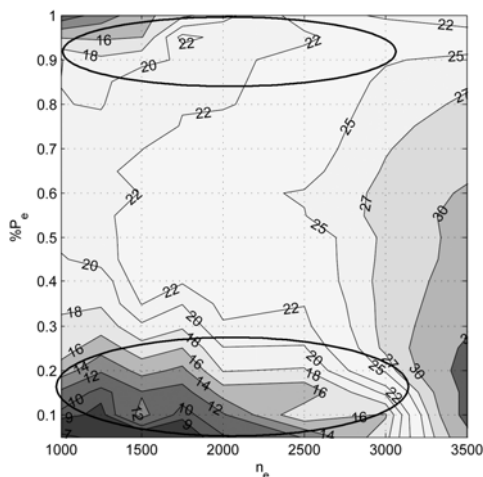


Рисунок 3 – Участок многопараметровой характеристики ДВС по удельным выбросам NO_x (г/кВтч)

На рисунках 2 б-г показаны результаты поиска оптимального управления для трех значений α из приведенного выше ряда. На этих рисунках хорошо видны изменения в характере использования мощности ДВС. При относительно малом весовом коэффициенте при NO_x (рисунок 2б) ДП выводит двигатель на внешнюю скоростную характеристику (ВСХ) и полностью отказывается от зарядки батарей во время равномерного движения. С точки зрения энергоэффективности объяснение этих решений следующее. ВСХ данного двигателя почти совпадает с его характеристикой минимальных удельных расходов (т.е. максимальных КПД). При этом значительная часть его мощности отправляется к колесам эффективным механическим путем, потому что на участках разгона мощность от сил сопротивления движению составляет более половины максимальной мощности ДВС. У данного двигателя в зоне малых частот (1000...2500 мин^{-1}) и большой загрузки имеется зона пониженных удельных выбросов NO_x (рисунок 3), чем и пользуется алгоритм поиска под влиянием появившейся значимости окислов азота в целевой функции.

Дальнейшее увеличение весового коэффициента при NO_x заставляет алгоритм поиска использовать малую загрузку ДВС (менее 25%), поскольку в этой области двигатель имеет наименьшие удельные выбросы окислов азота (рисунок 3). При этом, как будет видно на рисунке 4, путевой расход топлива начинает заметно увеличиваться. Изменения в использова-

нии мощности ДВС приводят к тому, что при равномерном движении генератор не используется, а на некоторых участках ускоренного движения электромашина помогает двигателю дополнительной тягой, хотя его максимальная мощность позволяет не только обеспечивать движение автомобиля, но и заряжать батарею.

На рисунке 4 представлены значения путевых расходов и вредных выбросов для базового и гибридного автомобилей, причем в случае гибрида эти показатели представлены в зависимости от весового коэффициента при NO_x , используемого при поиске оптимального управления ГСУ. Для СН и СО уровни норм Евро не показаны, поскольку значительно превышают выбросы этих веществ как гибридным, так и негибридным автомобилем. На рисунке видно, что при оптимизации одной лишь топливной экономичности расчетный путевой расход гибридного автомобиля более чем в два раза ниже, чем у базового. Увеличение веса NO_x в целевой функции, как и следовало ожидать, ведет к ухудшению топливной экономичности ГСУ. При переходе от $\alpha = 600$ к $\alpha = 800$ ДП начинает использовать малые загрузки двигателя при равномерном движении, чем существенно увеличивает путевой расход топлива, но и существенно снижает выбросы NO_x , приближая их к уровню норм Евро-5.

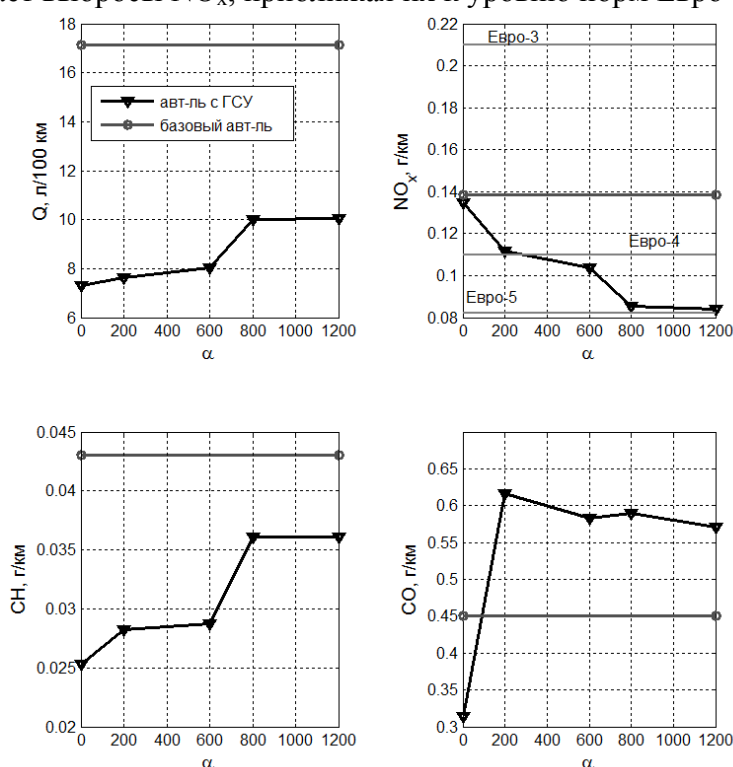


Рисунок 4 – Результаты поиска оптимального управления ГСУ при разных весовых коэффициентах (α) для NO_x .

Дальнейшее увеличение α не вызывает заметных изменений ни в топливной экономичности, ни в эмиссии NO_x . Таким образом, изменение режимов работы ДВС в ГСУ позволило снизить выбросы окислов азота на 38%, пропорционально увеличив при этом путевой расход гибридного автомобиля (тоже на 38%). Однако при этом надо помнить, что исходные различия в выбросах NO_x и путевых расходах негибридного и гибридного автомобилей составляли соответственно 3% и 55% в пользу гибрида. Поэтому итогом оптимизации режимов работы ДВС можно считать существенное снижение эмиссии NO_x при сохранении значительного преимущества гибрида в топливной экономичности (40% экономии).

Изменения выбросов СН в зависимости от α качественно сходны с изменениями в путевом расходе, при этом сохраняется преимущество гибридного автомобиля перед базовым. Напротив, даже при малом изменении веса NO_x в целевой функции выбросы СО растут значительно и превышают показатели базового автомобиля на 26%. Это связано с тем, что как на больших, так и на малых загрузках используемый ДВС имеет области увеличенных удельных выбросов СО.

Выводы

Динамическое программирование позволяет найти и исследовать особое свойство гибридной силовой установки – оптимальное управление. Оно не создается разработчиками непосредственно, а формируется схемой ГСУ, ее компонентным составом и автомобилем, на базе которого она создана. Критерии качества для поиска оптимального управления могут включать в себя показатели энергоэффективности ГСУ и экологических свойств автомобиля. Однако надо помнить, что оптимальное управление, найденное ДП, не является готовой стратегией управления ГСУ. Исследование оптимального управления выявляет пути создания оптимизированной стратегии, которая будет использована в реальной ГСУ.

Гибридная силовая установка дает существенную свободу управления режимной точкой ДВС и, следовательно, большие возможности выбора сочетаний топливно-экономических и экологических характеристик автомобиля. Критерии выбора могут быть различными. Например, реализация наилучшей топливной экономичности при условии выполнения законодательных норм по экологии. Или выполнение перспективных экологических требований при сохранении топливно-экономического преимущества перед базовым автомобилем. Или, наконец, максимальное снижение вредных выбросов при минимальном выигрыше в расходе топлива. Все эти сочетания обеспечиваются только настройками системы управления ГСУ и могут быть выбраны потребителем, покупающим гибридный автомобиль.

Литература

1. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М. «Наука», 1965 г.
2. Вентцель Е.С. Элементы динамического программирования. М. «Наука», 1961 г.
3. Карунин А.Л., Бахмутов С.В., Селифонов В.В., Круташов А.В., Баулина Е.Е., Авруцкий Е.В., Карпухин К.Е. Экспериментальный многоцелевой гибридный автомобиль. Автомобильная промышленность, №7 2006 г.

Роль информационно-измерительных систем в совершенствовании процесса испытаний колесных и гусеничных машин

Ларионова Ю.В.
МГТУ «МАМИ»
(495) 223-05-23, доб. 1305

Аннотация. В статье анализируется роль информационно-измерительных систем в совершенствовании процесса испытаний колесных и гусеничных машин.

Ключевые слова: испытания колесных и гусеничных машин, информационно-измерительные системы.

В современных условиях к испытаниям как к одному из важнейших этапов жизненного цикла изделий предъявляются весьма жесткие требования, связанные, главным образом, с переходом к получению и использованию результатов не отдельных измерений, а потоков измерительной информации. При этом получение всего объема измерительной информации должно выполняться за ограниченное время. Решение этой проблемы за счет увеличения персонала нецелесообразно, а иногда и вообще недопустимо из-за опасных условий эксперимента. Получается, что, с одной стороны, в силу сложившихся в РФ экономических условий объем испытаний и расходы на них неуклонно сокращаются, а с другой стороны, повышаются требования по их информативности и сокращению сроков получения измерительной информации, вплоть до реальных масштабов времени, то есть получение результатов в темпе эксперимента. Такие противоречивые требования могут быть удовлетворены только информативно-измерительными системами (ИИС), использующими самые современные ЭВМ. Основой большинства современных ИИС являются персональные компьютеры (ПК), в частности компьютеры типа «Ноутбук».