

ло проведено 25 огневых испытаний образцов при угле обстрела 0° и 60° к нормали при температуре 20°C . При нормальной температуре были выбраны наиболее оптимальные варианты в плане выполнения требований по стойкости брони и минимальной удельной массе. Выбранные варианты дополнительно испытывались при температуре -60°C . На основании защитных композиций, минимальных по удельной массе и успешно прошедших все испытания, была разработана конструкторская документация противоосколочной защиты кузова-контейнера.

Литература

1. Патент РФ № 2329455, МПК F41H5/04, публ.20.07.2008г. Авторы: Заболотский А.А., Козлова Т.М., Кулаков Н.А.
2. Кулаков Н.А., Любин А.Н. Исследование взаимодействия пробойника с композиционной защитной панелью. Известия МГТУ «МАМИ» №1(5), научный рецензируемый журнал. М. окт. 2008, 53-56с.
3. Кулаков Н.А., Любин А.Н. Особенности конструкции композитной брони повышенной живучести. Известия МГТУ «МАМИ» № 1(11), научный рецензируемый журнал. М. окт. 2001, 46-51с.
4. Заявка № 2010150701/11 от 13.12.2010 на изобретение “Композитная броня повышенной живучести”. Авторы: Кулаков Н.А., Любин А.Н.
5. Заявка № 2011139666/11 от 30.09.2011 на изобретение “Композитная броня с облицовочным слоем”. Авторы: Кулаков Н.А., Любин А.Н.
6. Заявка № 2011139667/11 от 30.09.2011 на изобретение “Комбинированная композитная броня”. Авторы: Кулаков Н.А., Любин А.Н.

Использование теории оптимального управления при исследовании силовой установки гибридного автомобиля

Куликов И.А.

Университет машиностроения
8(495)223-05-23 (1204), mansmart@list.ru

Аннотация. В статье описываются теоретические аспекты создания стратегии управления для автомобиля с гибридной силовой установкой (ГСУ). Охарактеризованы свойства ГСУ, которые определяют топливную экономичность и экологическую безопасность гибридного автомобиля. Проведен анализ энергообмена в ГСУ и предложен путь его оптимизации с помощью использования методов теории оптимального управления, в частности динамического программирования (ДП). Представлена математическая модель автомобиля с ГСУ, используемая в программе поиска управления ГСУ. Изложены теоретические основы динамического программирования. Описаны наиболее интересные результаты исследований, проведенных с использованием ДП. В конце статьи сделаны выводы о целесообразности использования динамического программирования при разработке и исследовании ГСУ.

Ключевые слова: гибридный автомобиль, гибридная силовая установка, ГСУ, стратегия управления ГСУ, оптимальное управление, динамическое программирование, математическое моделирование.

1. Свойства гибридных автомобилей

Основными целями создания гибридного автомобиля являются повышение эффективности использования энергии жидкого топлива (и, как следствие, уменьшение его расхода) и локальное улучшение экологической ситуации. Для достижения первой цели используются в основном два свойства комбинированной энергетической установки (КЭУ):

- возможность обеспечивать трогание и движение автомобиля на электрической тяге без использования двигателя внутреннего сгорания (ДВС), которая позволяет выключать ДВС при остановке автомобиля и, следовательно, не расходовать топливо в режиме холо-

стого хода;

- возможность возвращать часть энергии, сообщенной автомобилю для движения, во время замедления автомобиля. Эта функция называется рекуперацией кинетической энергии; она обеспечивается наличием генераторного режима у тяговой электрической машины КЭУ и наличием в КЭУ электрохимического накопителя энергии – батарей, которым генератор сообщает рекуперируемую энергию.

Кроме того, дополнительная экономия топлива может быть получена при восполнении заряда накопителей от ДВС. Эта функция используется в том случае, если рекуперированной энергии не хватает для поддержания уровня заряда накопителя в допустимом диапазоне. Для зарядки батарей от ДВС электромашина (тяговая или отдельный генератор) забирает часть энергии, вырабатываемой двигателем. Одновременно электромашина работает как регулятор загрузки двигателя, позволяя относительно независимо от режима движения автомобиля выбирать рабочую точку ДВС. Если в выбранной точке ДВС работает с высоким кпд и при этом вырабатываемая им энергия используется достаточно эффективно, то режим зарядки от ДВС можно использовать не только вынужденно, чтобы не допустить разрядку накопителей, но и специально, для улучшения топливной экономичности.

Улучшение экологии также связано с несколькими свойствами КЭУ. Во-первых, эффективное использование энергии, вырабатываемой ДВС, приводит к сжиганию меньшего количества топлива по сравнению с негибридными автомобилями, а следовательно, и уменьшению вредных выбросов (по крайней мере углеродсодержащих токсичных веществ). Во-вторых, использование электрической тяги для движения автомобилей позволяет вообще избежать загрязнения атмосферы транспортом в местах, которые особенно критичны с экологической точки зрения (центральные районы больших городов, транспортные тоннели, места с затрудненным движением). В-третьих, движение на электрической тяге не создает шумового загрязнения, которое также является существенной проблемой в больших городах и может становиться весьма критичным в ночное время суток.

2. Вопросы оптимизации энергообмена в КЭУ

В КЭУ энергия, выработанная тепловым двигателем, может быть сразу передана автомобилю для движения, а может быть направлена в батареи для временного хранения. Энергия, переданная автомобилю, может быть частично возвращена в КЭУ (рекуперирована) и сохранена в батареях. Таким образом, при работе КЭУ постоянно происходят процессы передачи и аккумуляции энергии, причем передача осуществляется по нескольким путям. В этих процессах часть энергии неизбежно теряется. Величина потерь обусловлена режимами работы передающих, преобразующих и аккумулирующих компонентов КЭУ, а эти режимы, в свою очередь, связаны друг с другом, поскольку компоненты работают как единая система, и с условиями движения автомобиля (скорость, ускорение).

При разработке стратегии управления КЭУ может возникнуть такая ситуация, что сосредоточение усилий на повышении кпд какого-то одного компонента, который был избран в качестве основного, приводит к тому, что связанные с ним другие компоненты работают в режимах с низкими кпд. В результате общая эффективность использования энергии в КЭУ становится низкой и топливная экономичность (а возможно, и экологические свойства) автомобиля ухудшаются. Часто таким доминирующим компонентом становится ДВС. В этом случае стратегия управления КЭУ строится вокруг обеспечения работы ДВС по так называемой характеристике минимальных удельных расходов топлива (ХМУР). Эта характеристика содержит рабочие точки, в каждой из которых обеспечивается минимальный удельный расход для соответствующей ей частоты вращения вала (фактически это точки максимального кпд двигателя для данной частоты). На первый взгляд, такой подход достаточно обоснован. ДВС осуществляет главное и, в случае негибридных автомобилей, часто очень неэффективное преобразование энергии топлива в энергию движения. Использование ХМУР увеличивает кпд двигателя на 10...15%, а в случае работы ДВС в одной точке ХМУР (КЭУ последовательного типа) увеличение кпд может составить до 20%. Как правило, точки ХМУР находятся близко к внешней характеристике ДВС. Если мощность, требуемая для движения, невели-

ка (например, движение равномерное), то ДВС, отслеживающий ХМУР, вырабатывает много избыточной энергии¹, которая забирается генератором в батарею. Таким образом, большое количество энергии отправляется по самому неэффективному пути (генератор → зарядка батареи → разрядка батареи → электромотор → трансмиссия), КПД которого зачастую составляет меньше 70%. Такое использование энергии сводит на нет преимущества ХМУР и даже может ухудшить топливную экономичность. Таким образом, энергоэффективность или, что то же самое, топливная экономичность автомобиля с КЭУ зависит не только от КПД теплового двигателя, а от КПД *всей* КЭУ. То же самое можно сказать и об экологических характеристиках автомобиля, поскольку концентрации вредных выбросов связаны в первую очередь с количеством сжигаемого топлива. Поэтому при разработке стратегии управления КЭУ необходимо искать не оптимальные режимы работы для каждого компонента отдельно, а режимы работы компонентов, которые обеспечивают эффективную работу всей КЭУ.

На начальном этапе разработки КЭУ стратегия управления создается для абстрактного объекта управления – математической модели автомобиля с КЭУ. Она состоит из моделей динамических процессов и моделей компонентов КЭУ. Динамические процессы описываются дифференциальными уравнениями. Компоненты же, как правило, представлены т.н. имитационными моделями, т.е. моделями типа «черный ящик». 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 КЭУ представляются в виде их характеристик КПД. Перечисленные характеристики отличаются высокой нелинейностью и многомерностью. Кроме того, задача усложняется тем, что КЭУ является динамическим объектом, состояние которого меняется в зависимости от режима движения автомобиля. Очевидно, что при таких условиях распространенный подход создания стратегий управления КЭУ – 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 КЭУ. 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 и тракторы» Университета машиностроения имеется опыт использования этого метода. Для оценки его эффективности в исследованиях и разработке КЭУ была создана программа поиска оптимального (по критерию энергоэффективности) управления для экспериментального гибридного автомобиля «МАМИ» [3]. В дальнейшем функциональность программы была расширена, что позволило проводить исследования с многокритериальными оценками – не только по топливной экономичности, но и по выбросам вредных веществ [4]. В настоящее время на базе существующих наработок создана программа, которая позволит искать и исследовать оптимальное управление КЭУ оригинальной последовательно-параллельной схемы, разработанной совместно Университетом машиностроения и ОАО «НПП «КВАНТ» [5].

Поиск оптимального управления проводится для наиболее характерных режимов работы автомобиля с КЭУ, то есть для движения в условиях города. Оно моделируется с помощью городских ездовых циклов, таких как ECE15 (городской цикл ЕЭК ООН) или FUDS (Federal Urban Driving Schedule – часть испытательной программы FTP, США).

3. Математическая модель автомобиля с КЭУ

Программы, которые используются в настоящее время [3, 4], созданы на основе математической модели автомобиля с экспериментальной КЭУ параллельного типа, разработанной в МАМИ (рисунок 1) [6].

¹ Речь в данном случае идет о КЭУ, в которой нет бесступенчатой трансмиссии. Последняя позволяет регулировать избыток мощности ДВС без отклонения от ХМУР. Однако сама по себе бесступенчатая трансмиссия может иметь весьма низкий КПД, который существенно ослабит эффект использования ХМУР.

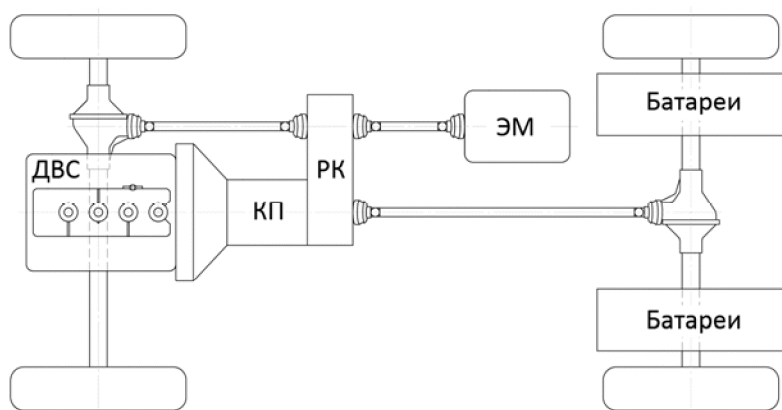


Рисунок 1 – Схема гибридной силовой установки экспериментального автомобиля «МАМИ»: КП – коробка передач, РК – раздаточная коробка, ЭМ - электромашин

Эта модель представляет собой упрощенный вариант модели, на которой основаны вычислительные эксперименты по определению различных свойств экспериментального автомобиля. Упрощенная модель включает два дифференциальных уравнения, первое из которых – уравнение динамики автомобиля:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(T_e \cdot u_{КП} \cdot \eta_{КП} + T_{ЭМ}) \cdot u_0 \cdot \eta_0 / r_k - F_{\psi}}{M_a + (4 \cdot I_k + (I_e \cdot u_{КП}^2 \cdot \eta_{КП} + I_{ЭМ}) \cdot u_0^2 \cdot \eta_0) / r_k^2}, \quad (1)$$

где: V – скорость автомобиля; T – крутящие моменты; u – передаточные числа; η – КПД; r_k – радиус колеса; F_{ψ} – сумма сил сопротивления движению; M_a – масса автомобиля; I – моменты инерции. Индексы: e – ДВС; $КП$ – коробка передач; $ЭМ$ – электромашин; 0 – главная передача.

Вторым компонентом динамической модели является уравнение баланса энергии в буферном накопителе:

$$E_{буф} = \eta_{буф,зар} \cdot \eta_{ЭМ,ген} \cdot \int P_{ЭМ,мех,ген} \cdot dt - \frac{\int P_{ЭМ,мех,тяг} \cdot dt}{\eta_{ЭМ,тяг} \cdot \eta_{буф,разр}}, \quad (2)$$

где: $E_{буф}$ – количество энергии в накопителе; $\eta_{буф}$ – КПД накопителя; $\eta_{ЭМ}$ – КПД электромашин; $P_{ЭМ,мех}$ – мощность на валу электромашин. Дополнительные индексы соответствуют: для накопителя: $зар$ – режиму зарядки; $разр$ – режиму разрядки; для электромашин: $ген$ – генераторному режиму; $тяг$ – режиму электротяги.

Первое слагаемое уравнения (2) – это энергия, запасаемая в накопителе при работе электромашин в режиме генератора, а второе – энергия, забираемая из накопителя при работе электромашин в режиме электромотора.

Модели компонентов КЭУ, как было сказано выше, представляют собой статические характеристики.

4. 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:

$$F = \sum_{t=0}^{N-1} L(x(t), u(t)) = \sum_{t=0}^{N-1} Q(t) + \sum_{t=0}^{N-1} \alpha \cdot mNO_x(t) + \sum_{t=0}^{N-1} \beta \cdot mCH(t) + \sum_{t=0}^{N-1} \gamma \cdot mCO(t), \quad (3)$$

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.

Алгоритм ДП должен найти управление, которое минимизирует целевую функцию в ездовом цикле.

Динамическая модель (1) и (2) содержит две переменные состояния: скорость автомобиля и количество энергии в накопителе. При движении в ездовом цикле скорость задана операционной картой цикла. Таким образом, остается только одна переменная состояния, которую можно свободно изменять (в пределах области допустимых значений), чтобы минимизировать целевую функцию, – это энергия батареи. Обычно для ее оценки используется степень зарядки накопителя, которую часто обозначают англоязычной аббревиатурой SOC (State of Charge) и измеряют в процентах или десятичной дробью, находящейся в пределах от 0 до 1.

В качестве управления, которое изменяет состояние модели, выбрана мощность электрической машины. Если коробка передач в КЭУ автоматизирована, то появляется вторая управляющая переменная – выбранная передача.

Перевести систему из одного состояния в другое можно бесконечным количеством путей, однако в таком виде задача не может быть решена на ЭВМ. Реализация поиска на ЭВМ требует перехода от непрерывной задачи к дискретной. Для этого необходимо разбить временной промежуток ездового цикла и область допустимых значений переменной состояния SOC на конечное число шагов. В результате получается сетка, каждый узел которой характеризуется моментом времени и значением SOC. Выбор некоторого управления переводит систему из одного узла-состояния в другой. Чем меньше шаги сетки, тем точнее можно определить состояние системы и тем больше становится узлов в сетке, что, в свою очередь, увеличивает время поиска.

Алгоритм поиска оптимального 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 (к минимизации целевой функции). Принцип оптимальности можно назвать дальновидным планированием. В случае дискретной задачи каждый шаг планируется с учетом всех будущих шагов.

Существует один шаг, который можно планировать без учета будущего. Очевидно, что это последний шаг. На нем можно выбрать управление 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.

Продemonстрируем использование алгоритма ДП на примере. Для этого рассмотрим фрагмент сетки (рисунок 2), на которой в горизонтальном направлении отложены шаги по времени, а вертикальном – шаги переменной состояния. Допустим, заданное конечное состояние системы достигается в узле В. В предыдущем состоянии система может находиться в одном из узлов D, F, G. Последний шаг должен перевести ее из этого состояния в узел В. Если система находилась в узле D, то последнему шагу соответствует вектор DB. Аналогично обозначаются переходы из двух других узлов: FB, GB. Для этих переходов записывается значение управления, необходимого для совершения перехода, и изменение целевой функ-

ции при этом переходе.

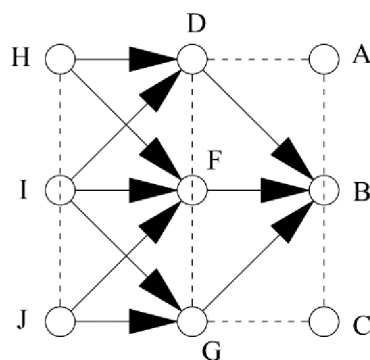


Рисунок 2 – К алгоритму динамического программирования

В состоянии, предшествующем предпоследнему, система могла находиться в одном из узлов H, I или J. Однако из этих узлов на предпоследнем шаге она могла переместиться либо в узел D, либо в F, либо в G. Появляются альтернативы. Какой переход выбрать, например, из узла H – HD или HF? Для ответа на этот вопрос воспользуемся принципом оптимальности. Предпоследний шаг должен быть таким, чтобы он *вместе с последним* давал минимум целевой функции. То есть сравнивать изменение целевой функции надо не на альтернативных шагах HD и HF, а на альтернативных путях HDB и HFB. Тот из них, который дает ее наименьшее значение, и следует выбирать. Такую же процедуру необходимо применить для узлов I и J. Выбирая шаги таким образом, алгоритм поиска движется от конца исследуемого процесса к его началу. В результате получаются так называемые *условно-оптимальные* пути (т.е. оптимальные пути, например, из H в B, из I в B и из J в B), из которых надо выбрать один оптимальный, который дает наименьшее значение целевой функции.

Следует сделать одно замечание относительно двух управлений, выбранных для модели КЭУ. Мощность электромашины используется в алгоритме программы поиска в соответствии с общей идеологией ДП – переходом от следствия к причине. То есть исходным пунктом является не управляющее воздействие, которое изменяет состояние системы, а, наоборот, изменение состояния системы, исходя из которого рассчитывается управление, которое вызвало это изменение. Применительно к модели КЭУ это осуществляется так: сначала рассчитывается изменение переменной состояния SOC (как разность между SOC в рассматриваемом в данный момент узле сетки и SOC в предыдущем состоянии системы), а затем дифференцирование SOC дает мощность, которую развивает электромашина, чтобы вызвать это изменение. Управление коробкой передач используется иначе. Оно не связано с изменением SOC. Возможность выбора разных передач увеличивает количество рабочих точек ДВС, которые в сочетании с уже рассчитанной рабочей точкой электромашины обеспечивают заданный цикл режим движения автомобиля.

Поиск оптимального управления методом ДП был реализован на ЭВМ в среде MATLAB/Simulink. Модель движения автомобиля с КЭУ была построена в Simulink. Алгоритм поиска условно-оптимальных управлений был реализован в виде программного кода MATLAB и встроен в модель Simulink. Преимуществом использованного программного обеспечения в поиске управлений методом ДП является то, что и MATLAB и Simulink оптимизированы для матричных вычислений. Использование матриц позволяет обрабатывать не одно состояние системы, а сразу всю сетку переменной состояния, что существенно ускоряет процесс поиска. Кроме того, перед началом поиска модель MATLAB/Simulink компилируется в исполняемый файл с помощью системы Real-Time Workshop. Это позволяет увеличить скорость вычислений в 8...10 раз.

5. Результаты исследований

В данном разделе представлены те результаты проведенных исследований, которые представляют наибольший интерес. Это результаты поиска оптимального управления КЭУ по критериям минимизации расхода топлива и выбросов вредных веществ с меняющимися весовыми коэффициентами для каждого слагаемого целевой функции (3) [4], а также резуль-

таты исследования влияния количества используемых передач в автоматической трансмиссии на энергоэффективность КЭУ [3].

Во всех проведенных исследованиях одним из ограничений области поиска оптимальных управлений являлось условие равенства SOC в начале и в конце ездового цикла. Это условие обычно называется обеспечением баланса энергии в накопителе. Его выполнение необходимо для того, чтобы корректно сравнивать результаты поисков управлений [3].

На рисунке 3 показан процесс изменения оптимального управления КЭУ в цикле ECE15, отражающий изменяющиеся приоритеты в целевой функции (исследовался автомобиль полной массой 3,5 т с бензиновым ДВС мощностью 105 кВт и электромашиной мощностью 65 кВт).

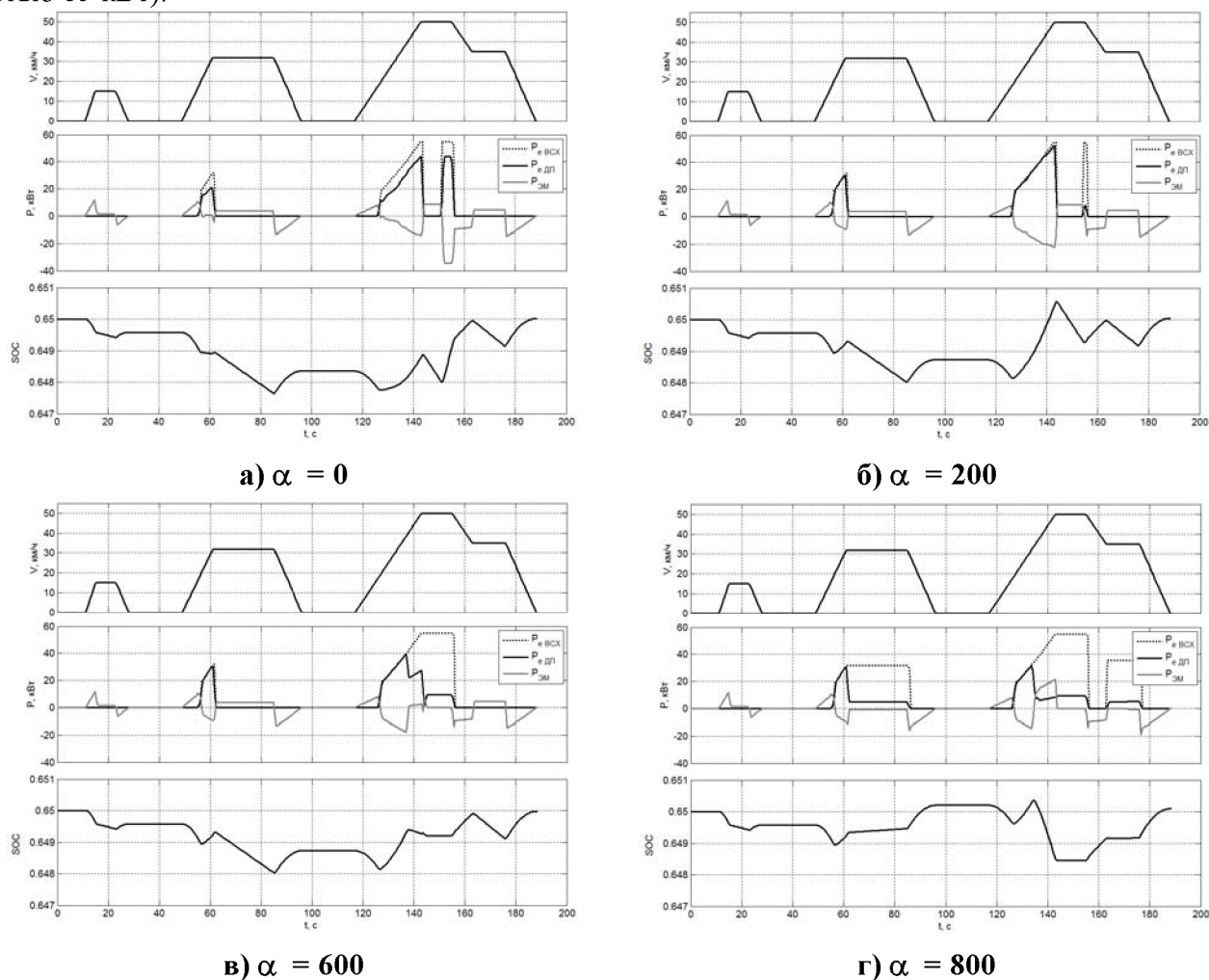


Рисунок 3 – Изменение оптимального управления ГСУ, обусловленное изменением весового коэффициента NO_x (α) в целевой функции

Первый поиск (рисунок 3а) был проведен только с одним критерием – минимальным расходом топлива в цикле. Расчетный путевой расход топлива Q гибридного автомобиля составил 45% от расчетного путевого расхода базового автомобиля (рисунок 4).

Далее был проведен анализ величин вредных выбросов.

По углеродсодержащим веществам (СО и СН) были получены значительные снижения выбросов по сравнению с базовым автомобилем (на рисунках не показаны пороговые значения норм Евро-3,4,5 по этим выбросам, поскольку они находятся значительно выше значений выбросов как автомобиля с КЭУ, так и базового автомобиля). Однако, несмотря на то, что гибридный автомобиль израсходовал в два раза меньше топлива, чем базовый, выбросы оксидов азота практически не снизились и остались на уровне норм Евро 3. Объясняется это тем, что при большой нагрузке ДВС удельный расход топлива снижается, а удельные выбросы NO_x , наоборот, увеличиваются. В этой связи оксиды азота были приняты наряду с расхо-

дом топлива критическим компонентом в целевой функции, и была проведена дополнительная серия прогонов программы с увеличением весового коэффициента при NO_x (рисунок 3 б, в, г). В результате было получено снижение выбросов оксидов азота с пропорциональным повышением путевого расхода (рисунок 4). В результате проведенной оптимизации управления моделью КЭУ гибридный автомобиль сохранил большое преимущество по топливной экономичности (экономия 40%) и повысил свой экологический класс с 3-го до 5-го.

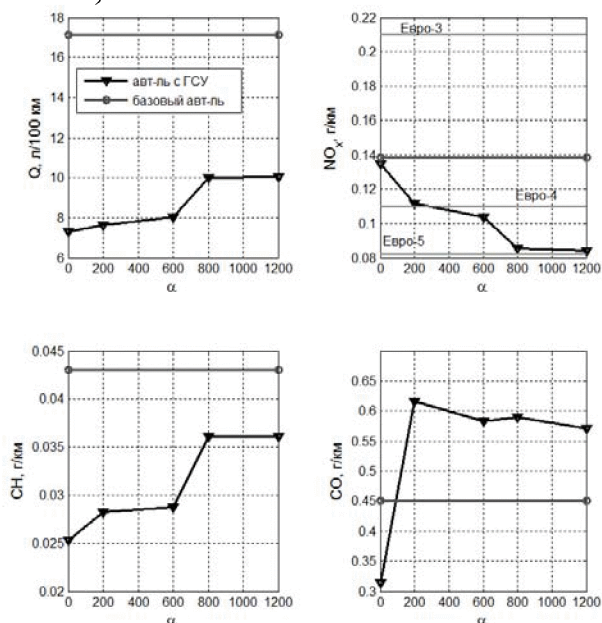


Рисунок 4 – Результаты поиска оптимального управления ГСУ при разных весовых коэффициентах (α) для NO_x

Цикл FUDS был использован для того, чтобы оценить эффект от увеличения числа используемых передач в КП с одной до трех (исследовался автомобиль полной массой 2,2 т с бензиновым ДВС мощностью 72 кВт и электромашинной мощностью 35 кВт). Сначала был проведен поиск оптимального управления с использованием только 3-й передачи в гибридном режиме, а затем повторный поиск, но уже с возможностью выбора между 2-й, 3-й и 4-й передачами. Результаты показаны на рисунке 5.

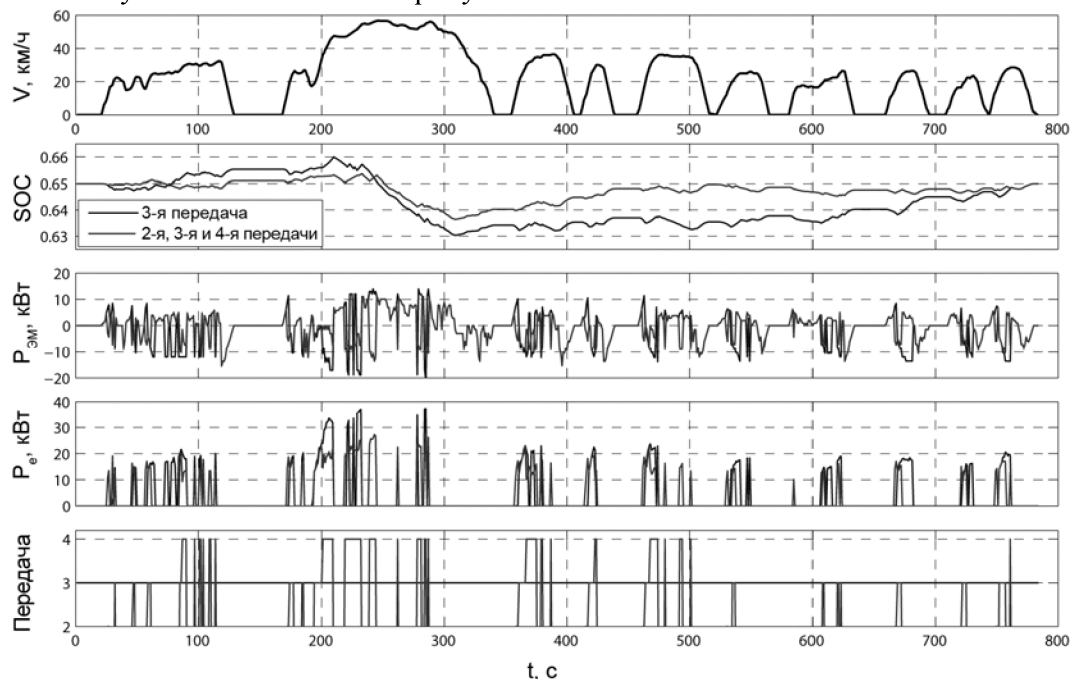


Рисунок 5 – Результаты поиска оптимального управления ГСУ в ездовом цикле FUDS с разным числом используемых передач автоматической КП

Поиск оптимального управления показал, что увеличение числа используемых передач снижает путь расход топлива на 7,2%, что является существенным резервом энергоэффективности. Экономия достигается за счет оптимизации режимов работы КЭУ как системы. Средняя мощность ДВС в цикле снизилась на 14,7% (с 19,5 кВт до 16,6 кВт), а максимальная мощность – на 26,9% (с 37,3 кВт до 27,3 кВт). Батареи стали заряжаться меньшей мощностью, но чаще, и при этом увеличился КПД электрического пути передачи энергии. График SOC на рис. 5 наглядно демонстрирует уменьшение энергопотока по электрическому пути: использование трех передач вместо одной значительно сокращает амплитуду изменения SOC (с 0,03 до 0,017, т.е. на 41,6%).

Выводы

Наличие динамического программирования в инструментарию разработки и исследования КЭУ дает новый подход к созданию стратегий управления для них. Он состоит в том, чтобы выявить оптимальное управление силовой установкой. Подчеркнем, что оптимальное управление не создается разработчиками КЭУ, оно является ее свойством, которое обусловлено ее структурой, составом и характеристиками компонентов. Оптимальное управление выявляется в виде рабочих точек компонентов КЭУ, которые динамическое программирование находит при имитации движения автомобиля в ездовых циклах. Полученные точки можно затем анализировать различными математическими методами: строить их распределения, зависимости оптимальных режимов работы компонентов от таких параметров, как скорость автомобиля или мощность, требуемая для движения [3] и т.д. Важно отметить, что ДП дает не готовую стратегию управления, его результаты следует использовать как основу для создания оптимизированных алгоритмов и законов управления, которые будут использоваться в контроллере КЭУ. Алгоритм ДП не может быть использован непосредственно в контроллере, поскольку процесс поиска оптимального управления долгий и ресурсоемкий.

На начальном этапе создания КЭУ перед разработчиками стоят задачи выбора ее схемы и компонентного состава. Как правило, решение этих задач подразумевает сравнение разных схем и вариантов КЭУ. Очевидно, что сравнение это может быть только расчетно-теоретическим. Критериями сравнения обычно являются топливно-экономические и экологические свойства автомобиля, которые обеспечивает ему та или иная КЭУ. Однако для того чтобы оценивать эти свойства, надо знать, как управлять КЭУ, а стратегий управления на этом этапе работ, разумеется, нет. В этом случае ДП оказывается незаменимым инструментом сравнения, ведь оно не опирается ни на какие стратегии – оно само их находит, причем только с помощью математических методов поиска, что обеспечивает объективность сравнения и освобождает разработчиков КЭУ от необходимости придумывать стратегии управления специально для целей сравнения (тем более что такие ad-hoc стратегии могут быть очень далеки от оптимальных, и ценность сравнения КЭУ с их использованием становится сомнительной).

В данной статье представлены результаты работы, выполненной при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ГК № 16.516.11.6062 от «28» апреля 2011 г.

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. Куликов И.А. Динамическое программирование как инструмент теоретического исследования силовой установки гибридного автомобиля. Журнал Автомобильных инженеров, №4 (63) 2010 г., №5 (64) 2010 г.
4. 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» №2 (10) 2010 г.
5. 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 (изобретение) РФ №2009141549 от 27. 07. 2011г.

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

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

к.т.н. проф. Лепешкин А.В.

Университет машиностроения

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

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

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

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

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

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