

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

**А.В. Бажинов, профессор, д.т.н., А.С. Паникарский, доцент, к.т.н.,
В.С. Боженков, аспирант, ХНАДУ**

***Аннотация.** Предложена методика предварительного определения основных параметров электросилового устройства легкового гибридного автомобиля. Приведены экспериментальные данные испытаний для автомобиля «Таврия».*

***Ключевые слова:** гибридный автомобиль, поток энергии, суперконденсатор.*

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОСИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

**О.В. Бажинов, профессор, д.т.н., О.С. Панікарський, доцент, к.т.н.,
В.С. Боженков, аспірант, ХНАДУ**

***Анотація.** Запропоновано методику попереднього визначення основних параметрів електросилової установки легкового гібридного автомобіля. Наведено експериментальні дані випробувань для автомобіля «Таврія».*

***Ключові слова:** гібридний автомобіль, потік енергії, суперконденсатор.*

METHODOLOGY OF HIBRID VEHICLE ELECTRIC POWER UNIT BASIC CHARACTERISTICS DETERMINATION

**A. Bazhinov, professor, dr. eng. sc., A. Panikarsky, associate professor, cand. eng. sc.,
V. Bozhenov, post graduate student, KhNAHU**

***Abstract.** The methodology of preliminary hybrid electric vehicle with lead-acid battery estimation is offered. The testing results of automobile «Tavria» are presented.*

***Key words:** hybrid vehicle, power flow, ultracapacitor.*

Введение

Начало этого столетия ознаменовалось неоспоримым фактом глобального потепления, несущим за собой потенциал глобальных экологических катастроф, а также небывалый темп роста цен на жидкое топливо, что создает угрозу продовольственной катастрофы в слаборазвитых странах.

Причина этих явлений кроется в техногенной деятельности человечества, нерационально использующего природные ресурсы планеты. Одним из главных источников загрязнения

среды обитания является автомобильный транспорт. И если в США и странах Западной Европы, а также в Японии вопросам борьбы с загрязнением окружающей среды уделяется должное внимание, то в Украине из-за слабости экономики и низких доходов населения нет экономической возможности в масштабных капиталовложениях в охрану окружающей среды. Тем не менее Украина входит в пятерку самых активных импортеров легковых автомобилей в Европе. Причем треть проданных новых автомобилей приходится на авто российского производства – ВАЗ, ГАЗ, УАЗ, ИЖ, четверть, на изготов-

ленные в Украине Daewoo и Chevrolet. Таким образом, треть новых проданных автомобилей базируется на разработках 25-летней давности, историческими прародителями которых являются ВАЗ-2101, ГАЗ-24-10, М-412.

Изменить ситуацию по составу моделей административными мерами нельзя, т.к. наш массовый потребитель ориентируется на покупку автомобилей эконом класса, а машины бизнес класса дают небольшой суммарный пробег по сравнению с авто, обслуживающими торговые точки и пассажироперевозки.

Анализ публикаций

Современные автомобильные двигатели, разработанные на постсоветском пространстве, хотя и приобрели инжекторный впрыск, далеки по экономичности от западно-европейских и японских. И несмотря на то, что новые автомобили по процентному содержанию вредных выбросов укладываются в нормы Евро-2, тем не менее, более важным показателем является весовое количество вредных выбросов на 100 км пути. С городскими пассажироперевозками дело обстоит еще хуже. По составу маршрутных такси доминируют модели, базирующиеся на двигателе «Газели».

Анализ достижений в разработке экономичных автомобилей с ДВС достаточно глубоко отражен в работе [3]. Дальнейшее улучшение показателей ДВС происходит лишь экстренным путем. Для кардинального решения вопроса необходим синергетический подход построения гибридного автомобиля, изложенный в работе [1].

Цель и постановка задачи

В связи с вышеизложенным возникает острая необходимость в снижении расхода топлива существующими автомобилями без вложения больших капиталов в разработку или покупку современных экономичных моделей двигателей на базе существующих в Украине производственных мощностей.

Опыт решения проблемы топливной экономичности и экологии ведущими производителями автомобилей

Рассмотрим, каким образом ведущие мировые автомобилестроители решают проблему

загрязнения окружающей среды и экономии топлива.

Один путь – это разработка и внедрение электромобилей. Однако традиционные свинцово-кислотные аккумуляторы не пригодны из-за большого веса, т.е. из-за плохого соотношения накопленной энергии к массе аккумулятора и малого количества полных циклов заряд-разряд. Литий-ионные аккумуляторы имеют хорошее соотношение энергии к массе, однако стоимость аккумуляторной батареи сопоставима со стоимостью всего остального электромобиля. В результате электромобиль имеет цену в два раза больше, чем аналогичный по потребительским свойствам бензиновый аналог. Кроме того, эксплуатационные свойства аккумуляторных батарей со временем ухудшаются, что приводит к сокращению междузарядного пробега и динамических параметров автомобиля. Замена аккумуляторной батареи в несколько раз дороже капитального ремонта ДВС.

Следует отметить, что электромобиль не является идеальным средством для улучшения экологии планеты, т.к. электростанции вырабатывают электроэнергию, которая приходит к потребителю через многократные преобразования, и КПД системы топливо-мощность на ведущей оси электромобиля имеет низкий показатель. Единственным преимуществом электромобиля является устранение вредных выбросов из района обитания населения.

Другим путем является экономия топлива с помощью гибридной силовой установки «ДВС+ электродвигатель». Данный подход позволяет добиться минимального выброса вредных веществ в атмосферу и сэкономить от 15 до 40 % топлива в городском цикле движения. Серийно выпускаемыми автомобилями с такой силовой установкой являются Toyota Prius, Honda Civic Hybrid, Lexus 400 h, Lexus 450 h, Ford Escape Hybrid. При этом по характеру взаимодействия силовых агрегатов гибридные силовые установки бывают параллельного типа, последовательного и смешанного [1]. Представителями параллельно-последовательного (смешанного) типа являются Toyota Prius и Lexus 400 h. Такие силовые агрегаты спроектированы почти с нуля и требуют значительной перестройки производства и больших капиталовложений как в разработку конструкции, так и в производственное оборудование. Гибридные авто-

мобили Honda Civic Hybrid примерно на 3 000 \$ дороже аналогичной модели со стандартной силовой установкой.

Активно ведутся новые разработки. Американская компания AFS Trinity Power продемонстрировала гибридный кроссовер ХН-150 с сенсационным средним расходом топлива 1,57 л/100 км! Независимо от режима движения первые 64 км пути ХН-150 проходит не подключая ДВС. И только тогда, когда иссякнут батареи, заряженные от бытовой сети, запускается ДВС [2].

Решение проблемы топливной экономичности и экологической чистоты путем модернизации пассажирского автотранспорта

Рассмотрим, каким образом автомобили, находящиеся на украинском рынке, можно модернизировать под гибридные силовые установки, сэкономить топливо и улучшить экологическую обстановку. Большой удельный расход получается при частичных нагрузках рис. 1 [3].

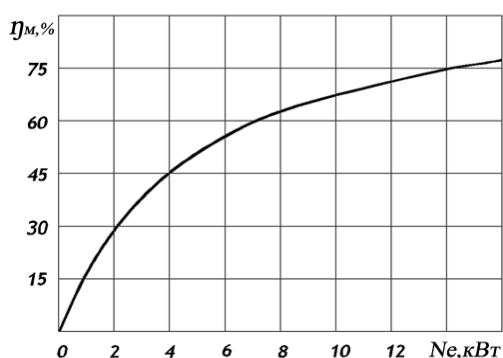


Рис. 1. Зависимость относительного уменьшения КПД ДВС от мощности нагрузки для легковых автомобилей

А именно этот режим зачастую имеет место в городском цикле движения. Не лучше дела обстоят и с современными ДВС. Так, по данным испытаний, представленными Мелитопольским заводом МеМЗ, для модели двигателя 307 удельный расход при мощности 5 кВт и 2000 об/мин составляет 450 г/кВт·час и при мощности 10 кВт и тех же оборотах 400 г/кВт·час, а также при мощности 10 кВт и 4000 об/мин 470 г/кВт·час. Процесс ухудшения КПД при частичных нагрузках неизбежен для ДВС, что обобщено в работе [3]. Этот процесс обусловлен ухудшением наполнения воздухом при приоткрытой дрос-

сельной заслонке, что приводит к снижению эффективного давления, худшей вентиляции полости цилиндра. В результате необходимо большее количество топлива для обеспечения стабильного горения в обедненном кислородом объеме воздуха. Из этого следует, что движение при частичных нагрузках ДВС необходимо заменить движением на электро-тяге.

Необходимо выбрать электродвигатель, который обеспечил бы ускорение движения автомобиля не менее того, которое соответствует европейскому городскому циклу. Данное условие обеспечивает беспрепятственную динамику движения транспортного потока. Далее авторы рассчитали, используя методику, изложенную в работе [4], необходимую мощность электродвигателя для обеспечения ускорения автомобиля в европейском городском цикле с учетом сопротивления качения и аэродинамического сопротивления.

При выборе электродвигателя необходимо руководствоваться следующими факторами:

- электродвигатель должен быть компактным и размещаться под кузовом автомобиля;
- питание электродвигателя – аккумуляторы и блок управления – должны занимать объем не более половины багажного отсека.

Для экспериментального моделирования нами был взят автомобиль ЗАЗ с полной массой 1100 кг и был проведен расчет мощности, которая необходима для движения с заданным по европейскому циклу ускорением до скорости 35 км/час (рис. 2). Из расчетов следует, что минимальная мощность электродвигателя для выбранного автомобиля составляет 10 кВт.

Чтобы обеспечить массогабаритные параметры электродвигателя, было решено использовать в качестве электродвигателя модернизированный стартер СТ-142Т, как обладающий достаточной надежностью (пробег до 350 тыс. км при работе в качестве стартера до первого капитального ремонта) [5]. Модернизация заключалась в установке ротора на подшипники, замене заднего щита на усиленный щит с воздухозаборником для принудительного охлаждения. На рабочем конце вала была установлена электромагнитная муфта для дистанционного включения и выключения привода на колеса. Поскольку

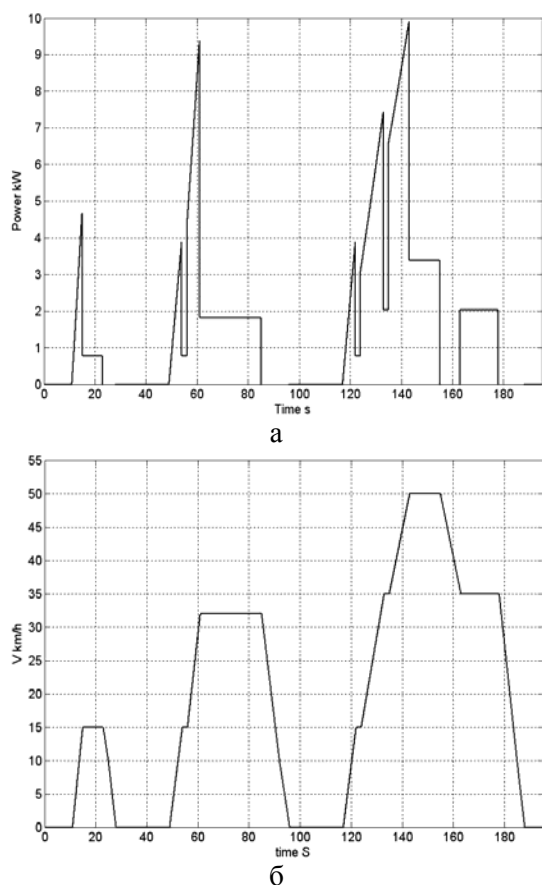


Рис. 2. Расчетные значения мощности в соответствии с движением: а – мощность, необходимая для ускорения автомобиля в условиях европейского городского цикла; б – график скорости европейского городского цикла

максимально допустимый ток через коллектор составляет 900 А, то система управления снабжена стабилизатором тока с данным предельным ограничением тока. Нагрузочная характеристика электродвигателя с условием ограничения по току приведена на рис. 3.

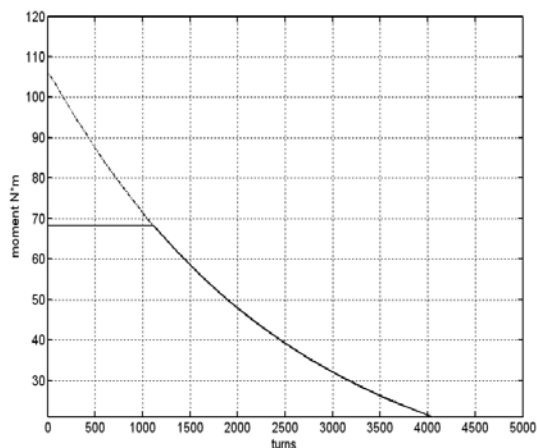


Рис. 3. Крутящий момент электродвигателя со стабилизатором тока в зависимости от оборотов

Используя нагрузочную характеристику электродвигателя, осуществлялся подбор передаточного числа КПП для обеспечения реализации ускорения автомобиля в соответствии с европейским городским циклом. В качестве коробки передач была использована КПП от автомобиля ЗАЗ-968, установленная с полуосями и ступицами колес на заднем мосту автомобиля.

Из графиков расчета получено, что наиболее близка по параметрам II-я передача КПП ЗАЗ-968.

Энергоемкость аккумулятора выбирается из условия, что заряд аккумулятора осуществляется при скоростях, требующих мощность при движении большую, чем мощность электродвигателя. При этом необходимо учитывать, что зарядный ток в амперах свинцово-кислотных аккумуляторов не должен превышать 0,5 числового значения емкости аккумулятора. Отсюда следует уравнение энергетического баланса для аккумулятора

$$\int_0^t P dt = U \cdot 0,5 C_0 \tau, \quad (1)$$

где $W_B = \int_0^t P dt$ – востребованная энергия из аккумулятора; P – мощность, необходимая в данный момент для ускорения автомобиля по европейскому городскому циклу; t – время ускорения автомобиля; τ – время заряда аккумулятора; U – номинальное напряжение аккумуляторной батареи; C – емкость батареи в А·часах.

В качестве источника питания были использованы 4 аккумулятора «Varta-110» и параллельно им суперконденсатор 80 Ф, который предназначен для сглаживания импульсов тока на аккумулятор при пусках электродвигателя.

Был собран экспериментальный автомобиль с гибридной силовой установкой, который как предполагено, должен двигаться до 35 км/час на электротяге, а далее включить ДВС и двигаться на III передаче.

К сожалению, в ходе эксперимента выяснилось, что полные испытания по городскому циклу провести нельзя из-за перегрева коллекторного узла при токах 800 – 900 А. Тем

не менее автомобиль вел себя удовлетворительно при равномерном движении и токе коллектора в 450 А.

Были проведены стендовые испытания автомобиля «Таврия» с электроприводом при постоянной скорости 8 км/час на предмет изучения изменения дорожных условий (рис. 4).

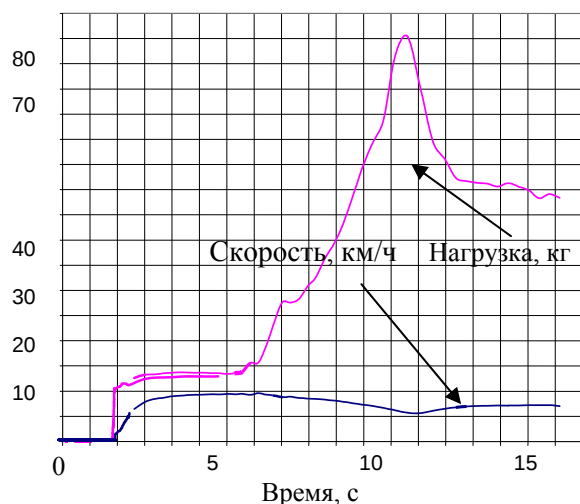


Рис. 4. Экспериментальный график возможного изменения нагрузки на ведущую ось автомобиля при питании электродвигателя напряжением 10 В

При напряжении питания 10 В и среднем токе 450 А автомобиль может преодолевать уклон 5 % или изменения коэффициента дорожного сопротивления с 0,015 до 0,05, при этом скорость автомобиля снижалась с 8 км/час до 7 км/час. Данный эксперимент подтвердил целесообразность применения электротяги при движении в автомобильных пробках.

Что касается надежности работы коллекторного узла, то необходимо увеличить число витков ротора и статора в 3 раза для питания 75 В, чтобы произведение $A \cdot \text{витков}$ осталось неизменным, тогда коллекторный узел данной конструкции будет надежным и долговечным при питании тока не более 450 А во время старта. Вторым недостатком экспериментального двигателя был невысокий КПД, равный 70 %.

КПД улучшится, если изменить зазор между полюсными наконечниками и ротором путем совместной обработки статорного узла под диаметр ротора и доведения зазора между ними до 0,5 мм. В настоящее время зазор

между полюсным наконечником и ротором в ряде мест может достигать до 2 мм, что значительно ослабляет магнитный поток.

На основе изложенных выше предположений и экспериментальных факторов можно предложить следующую методику к эскизному расчету автомобиля с гибридной силовой установкой.

1. По данным расхода топлива, при малых скоростях выбирается диапазон скоростей движения, при которых движение осуществляется на электротяге. Для малолитражных автомобилей с двигателем до 1,6 л это до 35 км/час, для автомобилей с двигателем 2,5 л и выше – это до 40 км/час – 60 км/час.

2. Производится расчет минимальной необходимой мощности электродвигателя для автомобиля с полной нагрузкой при условии обеспечения ускорения европейского городского цикла. При этом масса снаряженного автомобиля принимается на 15 % больше, чем масса автомобиля – прототипа без гибридной силовой установки. Эта мощность должна соответствовать участку характеристики электродвигателя с максимальным КПД. Максимальная мощность электродвигателя, естественно, будет превышать минимально необходимую на 30 – 50 %. Это обеспечит динамику ускорения автомобиля в неблагоприятных дорожных условиях. Тем не менее, не следует увлекаться избыточной мощностью электродвигателя, так как это приведет к увеличению пусковых токов и необходимости применения большой батареи суперконденсаторов. Совокупность стоимости электродвигателя и конденсаторов может значительно увеличить стоимость силовой установки.

3. Далее производится расчет передаточного отношения трансмиссии электродвигателя. Учитывая то обстоятельство, что электродвигатели имеют большой пусковой момент, расчет производится в предположении, что весь диапазон работы силовой установки на электротяге будет осуществляться на одном передаточном отношении. Такой подход упрощает трансмиссию, снижает ее стоимость и увеличивает КПД за счет уменьшения приведенной массы. Если расчетные кривые не удовлетворяют данному условию, то электродвигатель выбирают большей мощности и расчет трансмиссии повторяют.

4. По электрическим характеристикам выбранного электродвигателя определяют пусковой ток. В соответствии со значением пускового тока выбирают тип аккумулятора и конденсатора. При этом соотношение распределения пускового тока между аккумулятором и конденсатором обратно пропорционально их внутренним сопротивлениям.

5. Из условия энергетического баланса заряд-разряд для аккумулятора рассчитывают емкость аккумулятора.

6. Далее проверяют работоспособность аккумулятора в режиме движения автомобиля с максимальным ускорением согласно европейскому городскому циклу. Определяют сопротивление электродвигателя в этом режиме. Внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи должно быть не менее чем в 5 раз меньше, чем сопротивление нагрузки. В этом случае не менее 80 % запасенной аккумулятором энергии будет реализовано в механическую энергию.

7. По габаритным размерам электродвигателя и аккумуляторов и их массе проектируют компоновку гибридного автомобиля. При этом снаряженная масса гибридного автомобиля не должна быть больше, чем на 15 %, массы автомобиля – прототипа. Изыскиваются резервы по уменьшению массы автомобиля путем замены ненагруженных деталей на легкие пластмассовые, а также замены некоторых узлов на легкие сплавы: диски колес, капот, крышка багажника и др.

Выводы

На основе разработанной учеными ХНАДУ методики, которая подтверждена экспериментальными данными, доказана возможность модернизации любого переднеприводного автомобиля под гибридную силовую установку. При этом автомобиль работает на электротяге в местах наибольшего скопления людей, расходует на 20 – 25 % меньше топлива и имеет значительно больший ресурс работы ДВС.

Кроме того, установка электропривода на заднюю ось увеличивает безопасность движения за счет рекуперативного торможения электродвигателем, т.к. это система обладает меньшим временем реакции по сравнению с гидравликой. А также увеличивается проходимость автомобиля при движении по бездорожью при совместном включении переднего и заднего приводов.

Эта модернизация возможна на основе тех узлов и агрегатов, которые украинская промышленность может выпускать без существенных капиталовложений на имеющемся оборудовании.

Такой подход не увеличит стоимость автомобиля с гибридным приводом более чем на 15 %, а его преимущества для экологии очевидны.

Литература

1. Смирнов О.П. Аналіз схемних рішень побудови автомобіля з гібридною енергетичною установкою // Вестник ХНАДУ: сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2006. – Вып. 32. – С. 41–43.
2. Auto Bild. Все ведущие. Январь-февраль. 2008. – №1. – С. 8.
3. Мацкерле Ю. Современный экономичный автомобиль / Пер. с чешского В.Б. Иванова. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
4. Смирнов О.П. Богаевский О.Б., Боженков В.С., Панікарський О.С. Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем». – Харків: ХНАДУ, 2007. – С. 27.
5. Электрооборудование автомобилей: справочник / Акимов А.В., Акимов О.А., Акимов С.В. и др. / Под ред. Ю. П. Чиждова. – М.: Транспорт, 1993. – С. 223.

Рецензент: О.П. Алексеев, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 31 июля 2009 г.