

АВТОМОБИЛЬ «ГАЗЕЛЬ» С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной задачей является экономия горючего за счет рекуперации энергии при торможении автомобиля (городской цикл движения, предполагаемое снижение расхода топлива на 40...50%).

Исходные данные:

1. Полная масса с нагрузкой $\approx 3000...3500$ кг (например, микроавтобус «Газель» или фургон-грузовик).
2. Длительное движение на подъем 15% при скорости 40 км/час (11,1 м/с).
3. Максимальная скорость движения – 110 км/час (в динамике и при обгоне).
4. Мощность двигателя внутреннего сгорания (ДВС) ≈ 60 кВт (длительная).

Дополнительные данные:

1. Диаметр колеса $\approx 0,6$ м. Заднеприводной автомобиль.
2. Понижающая передача в дифференциале заднего моста, $K = 0,2$.

Выбор технического решения:

1. Для системы привода принимается схема с последовательной электромеханической трансмиссией и высоковольтным химическим аккумулятором (300...500 В), а также, возможно, с дополнительной конденсаторной батареей, имеющей высокую кратковременную мощность.
2. Суммарный запас энергии батарей – на 3-5 разгонов до скорости 72 км/час, кратковременная мощность – 45...60 кВт при заряде-разряде, общая масса батарей $\approx 60...80$ кг. Емкость батарей – 4...6 А*часов (примерно на 5...10 минут движения со скоростью 40...50 км/час).
3. Мощность электрогенератора на валу ДВС ≈ 60 кВт (длительно, кратковременно ≈ 120 кВт).
4. Мощность электродвигателя на карданном валу ≈ 60 кВт (длительно, кратковременно ≈ 120 кВт).
5. Максимальная мощность тягового электродвигателя $\approx 140...160$ кВт (кратковременно).

Результаты расчетов и экспертных оценок:

- Скатывающая сила – 4360 Н (15% подъем).
- Мощность при движении на горизонтальном участке при 40 км/час ≈ 5 кВт (экспертная оценка).
- Мощность на преодоление 15% подъема со скоростью 40 км/час $\approx 48,4$ кВт (длительно).
- Суммарная мощность приводного электродвигателя в указанном выше режиме движения – 53,4 кВт.
- Скорость вращения колес автомобиля – 5,9 об/с (при 40 км/час).
- Скорость вращения приводного электродвигателя ≈ 2000 об/мин (при 40 км/час).
- Номинальный момент на валу приводного электродвигателя ≈ 300 Н*м, длительно (при 40 км/час).
- Длительное номинальное ускорение – 1,7 м/с² (максимальное ускорение в динамике $\approx 2...3$ м/с²).
- Время разгона до скорости 72 км/час – не более 12 секунд (даже без суммирования мощностей).
- Максимальная скорость движения – 110 км/час (≈ 6000 об/мин на двигателе привода).
- Выходная мощность частотного инвертора – 60 кВт, (длительно, кратковременно – 120 кВт).
- Мощность рекуперативного преобразователя – 60 кВт, (длительно, кратковременно – 120 кВт).
- Общая масса частотного инвертора и рекуперативного преобразователя ≈ 100 кг.
- Частотный инвертор и рекуперативный преобразователь имеют воздушное охлаждение.

Выбор технического решения для электрических машин (вариант):

- Применяются синхронные магнитно-реактивные электрические машины для тягового привода.
- Делительный диаметр (по магнитной дороге) $\approx 0,290$ м, 6 пар полюсов, магниты железо-неодим-бор.
- Удельная сила тяги по магнитному зазору (длительный режим) ≈ 3 Н/см².
- Толщина набора пакета статора (ширина магнитной дороги) – 60 мм.
- Генератор и двигатель могут иметь практически одинаковые конструкции (унификация по узлам).
- Коэффициент полезного действия электрических машин $\approx 0,97$ (при мощности 60 кВт).
- Обе машины имеют принудительное внешнее воздушное охлаждение.
- За основу взят модельный ряд тяговых двигателей «Орион - 18 - 2М» (www.orionmotor.narod.ru).
- Габариты электрических машин: диаметр ≈ 400 мм, длина по оси ≈ 250 мм. Масса $\approx 60...80$ кг.
- Рыночная стоимость таких серийных электрических машин $\approx 600...800$ USD (≈ 10 USD/кг, ≈ 10 USD/кВт).

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИИ

- При этой схеме трансмиссии ДВС приводит в движение генератор, а вырабатываемая им электроэнергия питает электродвигатель, вращающий ведущие колеса. Последовательную схему называют потому, что поток мощности поступает на ведущие колеса, проходя ряд преобразований. От механической энергии, вырабатываемой ДВС, в электрическую энергию, вырабатываемую генератором, и опять в механическую. Данная схема позволяет использовать ДВС относительно малой мощности, при его постоянной работе в диапазоне максимального КПД (в крейсерском режиме движения). Это позволяет стабильно генерировать достаточное количество энергии для питания электродвигателя и заряда аккумуляторной батареи.
- Данная схема позволяет легче выполнить новые экологические нормы для ДВС, продлить ресурс двигателя, обеспечивает экономию горючего за счет рекуперации энергии при торможении автомобиля и за счет постоянной работы ДВС в диапазоне максимального КПД.
- В целом система такого электропривода выполняет и функцию автоматической коробки передач, снижая утомляемость водителя и обеспечивая повышенную безопасность движения.
- Электродвигатель выполняет функции маховика, стартера и бортового генератора.
- Добавляется специальное электрооборудование: частотные инверторы, преобразователи, бортовая ЭВМ, различные датчики (остальное указано выше).
- Наличие мощного высоковольтного источника электроэнергии на борту автомобиля позволяет по-новому решать задачи для вспомогательных систем транспортного средства (кондиционер, обогреватель, холодильник, радиотелевизионные устройства, электроусилитель руля, освещение, приводы дверей, люков).
- Можно сохранить и традиционные низковольтные приводы и системы с 12-вольтовым питанием.
- Отсутствуют некоторые традиционные узлы и агрегаты: маховик, стартер, генератор, муфта сцепления, коробка переключения скоростей. Бортовой аккумулятор на 12 В остается, но меньшей емкости.
- Предусматривается возможность суммирования электрической мощности с электродвигателя (60 кВт) и батареи (45...60 кВт) при разгоне автомобиля или при выполнении обгона.
- Рекуперация энергии и заряд аккумулятора производится при переключении тягового электродвигателя в режим генератора при торможении или при движении под уклон, а запасенная батареей энергия питает обратимую машину, переключившуюся в режим электродвигателя, которая, в свою очередь, вращает ведущие колеса.
- Предварительная оценка эффективности режима рекуперации – возврат при торможении до 75 % накопленной кинетической энергии (городской цикл движения с ограничением скорости на уровне 60 км/час и плавным торможением).
- Известные из технической литературы сведения по такому техническому решению позволяют уверенно утверждать, что при данной схеме трансмиссии расход топлива снизится примерно на 40...50%.
- Применение высоковольтных синхронных двигателей, предназначенных для тягового привода, позволяет реализовать электропривод без применения понижающих планетарных редукторов на валу электродвигателя. Двигатель и генератор являются относительно низкооборотными моторами и напрямую подключаются к карданному валу заднего моста и к выходному валу ДВС, соответственно. Электрические машины этого типа имеют весьма высокую удельную мощность при относительно низких оборотах 1 кВт на 1 кг массы двигателя или генератора при 2000 об/мин.
- **Энергетический центр** – уникальная система, управляющая созданием и распределением запасов электрической энергии, хранящейся в батарее и создаваемой генератором. Основные компоненты энергетического центра: мощная высоковольтная батарея, блок управления энергией, полупроводниковое коммутационное устройство, рекуперативная тормозная система.
- **Блок управления энергией** и полупроводниковое устройство переключения управляют потоком энергии между генератором, батареей и электромотором. Данные устройства осуществляют преобразование электроэнергии в соответствии с текущими потребностями системы. Потребность в преобразовании продиктована следующими причинами: генератор и электромотор – машины переменного тока, в то время как аккумулятор оперирует постоянным током, кроме того, выходное напряжение батареи не соответствует выходному напряжению генератора, а также входному напряжению инвертора, управляющего тяговым электромотором.
- **Инвертор** – блок, преобразующий постоянный ток, поступающий от аккумуляторной батареи, в переменный ток, используемый для питания электромотора. В силовой установке предусмотрена высоковольтная схема преобразования одного постоянного тока в другой, тоже постоянный. Но поскольку она повышает напряжение, то происходит равномерный рост электрической мощности при той же величине значения тока. В результате получают более высокую производительность и повышенный крутящий момент тягового электромотора.
- **Рекуперативная тормозная система** при торможении переводит тяговый электромотор в генераторный режим. Вырабатываемая при этом электроэнергия используется для заряда аккумуляторной батареи. Особо эффективную работу система обеспечивает в городских условиях, при чередовании режимов старт-стоп. Заметим, что в традиционных тормозных системах кинетическая энергия автомобиля при замедлении теряется полностью.

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ

Начало движения.

Для начала движения и на малых скоростях ДВС может не использоваться (он может быть остановлен). При плавном наборе скорости энергия, запасенная в батарее, поступает на блок управления электропитанием. Он, в свою очередь, направляет энергию на электродвигатель, что позволяет автомобилю плавно трогаться с места. При достижении определенной скорости или при недостаточном запасе энергии в батарее производится запуск ДВС.

Движение в нормальном режиме.

В этом случае ДВС приводит во вращение генератор, с которого энергия передается в энергетический центр и с него на электродвигатель, передающий момент на ведущие колеса. При необходимости генератор осуществляет заряд батареи, отдавая ей излишки энергии. Следует отметить, что полный заряд батареи нежелателен, поскольку при рекуперативном торможении батарея должна иметь возможность принять определенное количество энергии.

Разгон.

При переходе с нормальной скорости на повышенную или максимальную скорость основная доля энергии на тяговый электродвигатель по-прежнему поступает с генератора, однако для улучшения динамики дополнительная энергия может быть взята от батареи. При этом мощность привода равна суммарной мощности ДВС и батареи.

Торможение.

Для оптимизации количества сохраняемой энергии управляемая электроникой тормозная система принимает решение о том, когда следует использовать гидравлическую систему, а когда – рекуперативное торможение (оно и является приоритетным). При рекуперативном торможении тяговый электродвигатель работает в генераторном режиме, создавая тормозной момент на ведущей оси. Вырабатываемая энергия поступает на блок управления электропитанием, а оттуда на высоковольтную аккумуляторную батарею.

Разработчик – МИХАЛЕВ А. И.

(Минск, 18.06.2013)

orion_mai@inbox.ru



Двигатель «Орион - 18 - 1 - 06» (45 кВт) на международной электротехнической выставке (г. Минск, октябрь 2009 года).