

АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ГИБРИДНЫХ ПРИВОДОВ АВТОТРАНСПОРТА

© 2012 А. Ф. Синяков, А. Г. Гимадиев, В. Н. Илюхин, В. Я. Свербилов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Изложен материал, полученный в результате аналитического обзора научно-технической литературы с оценкой актуальности использования и основных направлений развития гибридных приводов автотранспорта.

Гидравлический гибридный привод, электрический гибрид, рекуперация энергии, экономия топлива, вредные выбросы, обзор, анализ эффективности.

Введение

Гибридный автомобиль – это транспортное средство (ТС), использующее для привода ведущих колёс источники энергии различного типа. Например, источники тепловой, гидравлической, электрической энергии, входящие в гибридную силовую установку (ГСУ). Тенденция развития и увеличение производства гибридов обусловлены повышением требований международных стандартов к экологической безопасности и экономичности ТС, а также ростом цен на углеводородное топливо. Перспективность использования гибридных технологий заключается в значительном снижении расхода топлива ТС, а также количества вредных выбросов в окружающую среду, что особенно актуально для городского автотранспорта.

Когда речь идёт о гибридном автомобиле, то в первую очередь могут возникнуть ассоциации, связанные с электрическими гибридами, в которых в качестве первичного источника энергии используется двигатель внутреннего сгорания (ДВС), бензиновый или дизельный, а вторичным является электрический накопитель энергии (батарея или суперконденсатор), связанный с электродвигателем-генератором. В промышленном масштабе налажено производство легковых автомобилей, мелкосерийное производство фургонов, автобусов и грузовиков, в которых используется комбинация ДВС и электропривода.

Ещё одна технология совмещения приводов – это гидравлические гибриды. Основными компонентами, входящими в состав гидравлических ГСУ, являются ДВС, насос-

моторы, аккумулятор высокого давления и бак низкого давления, трубопроводы, электронный блок управления. По данным существующих исследований эффективность использования энергии, экономичность и эксплуатационные характеристики гидравлических гибридов не уступают электрогибридам, а по некоторым основным параметрам превосходят их. В связи с этим целесообразно сравнить эти технологии и выявить их индивидуальные особенности в соответствии с поставленными задачами:

- использование ДВС только на режимах, соответствующих высокому коэффициенту полезного действия (КПД);
- выбор оптимального соотношения мощности ДВС и аккумулятора энергии;
- уменьшение рабочего объёма двигателя, применение прогрессивных рабочих процессов;
- использование технологии start/stop, при которой ДВС выключается при прекращении движения ТС и запускается при достижении определённой скорости;
- рекуперация энергии торможения с наибольшей эффективностью;
- применение переменной трансмиссии.

Как отмечают производители, гидравлическая гибридная технология имеет большой коммерческий потенциал для широкого диапазона ТС, которые совершают частые кратковременные остановки (режим движения «stop-and-go»), такие как городские и пригородные автобусы, маршрутные такси, фургоны и грузовики, доставляющие продукцию, мусоровозы. Если автомобиль чаще передвигается с постоянной скоростью, то лучше использовать электрическую ГСУ.

Классификация ТС с ГСУ

На сегодняшний день с учётом развития гибридных технологий образовалось несколько классификаций ТС с ГСУ. Первая - по типу накопителей (электрические, гидромеханические). Вторая - по степени гибридации (микрогибрид (micro hybrid), мягкий гибрид (mild hybrid), полный гибрид (full hybrid)). Третья - по типу конструктивных схем ГСУ. Рассмотрим более подробно третью классификацию как наиболее важную.

Последовательная схема ГСУ

В последовательной схеме ГСУ, изображённой на рис. 1, отсутствует механическая связь между ДВС и ведущими колёсами. ДВС соединён с насосом, питающим гидромотор, посредством которого крутящий момент передаётся на колёса и заряжается аккумулятор.

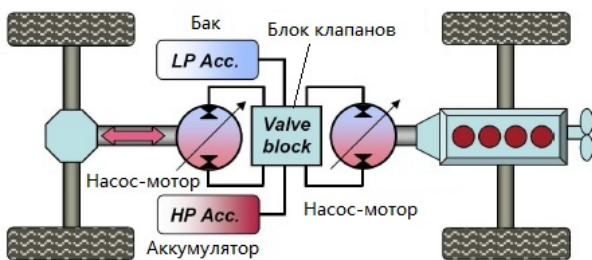


Рис. 1. Последовательная схема ГСУ

Когда аккумулятор полностью заряжен, двигатель автоматически отключается, а при необходимости пополнения запаса энергии запускается вновь. Эта схема позволяет эксплуатировать двигатель малой мощности с наибольшей эффективной комбинацией крутящего момента и скорости, добиваясь максимальной топливной эффективности и минимальных выбросов. Последовательные гибриды приспособлены к малым скоростям в режиме движения «stop-and-go». Внедрить такую схему просто, т. к. можно обеспечить любую компоновку элементов привода. Потери энергии в такой схеме больше, чем в механической трансмиссии, но они покрываются за счёт рекуперации.

Принцип работы последовательной схемы ГСУ удобно рассматривать по частям, в зависимости от условий движения гибридного автомобиля:

1. Режим лёгкого ускорения и короткий по времени крейсерский режим.

При нажатии педали газа насос-мотор использует высокое давление жидкости из аккумулятора для вращения колёс.

2. Режим крейсерского движения.

Когда уровень давления в аккумуляторе становится равным минимальному значению, то включается двигатель и начинает перекачивать жидкость из бака в аккумулятор. Двигатель выключается при достижении максимально установленного давления в аккумуляторе.

3. Режим рекуперативного торможения.

В режиме движения «stop-and-go» ключевым является процесс рекуперативного торможения, при котором в аккумулятор запасается основная часть энергии. Когда автомобиль начинает тормозить, насос-мотор использует инерцию автомобиля для повышения давления жидкости в аккумуляторе. При новом ускорении запасённая энергия из аккумулятора идёт на разгон автомобиля.

Параллельная схема ГСУ

В параллельной схеме ГСУ, изображённой на рис. 2, крутящий момент двигателя через трансмиссию и карданный вал передаётся на ведущие колёса. Гидравлические компоненты, связанные с валом, помогают при ускорении ТС. ДВС и гидропривод могут работать независимо друг от друга.

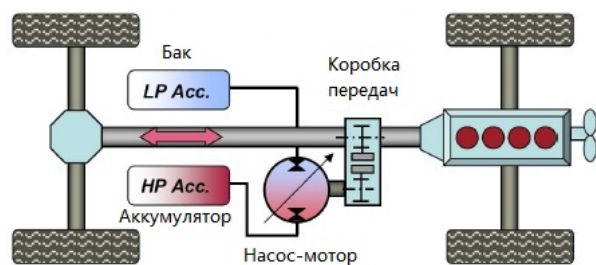


Рис. 2. Параллельная схема ГСУ

Параллельная схема имеет высокий КПД и хорошие массогабаритные показатели, относительно дешёвая. К недостаткам параллельной схемы относится сложность согласования работы ДВС и гидропривода. От этого можно уйти, обеспечив передачу момента на разные колёса. Однако такой приём не всегда допустим по условиям размещения тягового оборудования и баланса масс ТС.

Для параллельной схемы ГСУ можно выделить четыре режима работы:

1. Режим с лёгким ускорением.

Гидравлический привод приводит в движение ТС до скорости 40-60 км/ч.

2. Режим длительного ускорения.

Гидравлический привод действует совместно с двигателем.

3. Режим крейсерского движения.

Движение осуществляется только за счёт двигателя.

4. Режим рекуперативного торможения.

Последовательно-параллельная схема ГСУ

Последовательно-параллельная (комбинированная) схема может работать как последовательно, так и параллельно. Комбинированная схема объединяет преимущества последовательной и параллельной схемы. Распределение мощности от двигателя и гидропривода к ведущим колёсам осуществляется через механический и гидравлический канал в соотношении от 0 до 100% от номинальной мощности.

В последовательно-параллельной схеме ГСУ выделяются следующие режимы работы:

1. Режим с лёгким ускорением.

2. Режим крейсерского движения

Движение осуществляется за счёт двигателя и гидропривода.

3. Режим длительного ускорения.

4. Режим рекуперативного торможения.

Такая схема обеспечивает высокую экономичность, максимальную гибкость в режимах работы системы тягового привода, но является сложной в разработке и реализации, требует создания сложных и дорогих механических элементов.

Реальные схемы ГСУ современных автомобилей, как правило, сложнее и многообразнее по способу компоновки элементов системы.

Оценка эффективности ГСУ

Как отмечалось выше, концептуальные основы электрических и гидравлических гибридов схожи. Поэтому эксплуатационные, технические и экономические преимущества и недостатки присущи обоим типам гибридов (табл. 1-3).

Таблица 1. Характеристики гибридных автомобилей

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> - Экономия топлива за счёт дополнительного привода и рекуперации энергии торможения, высокого КПД гидромотора/электромотора на всём диапазоне рабочих параметров, а также использования двигателя меньшей мощности. - Снижение уровня вредных выбросов. - Быстрая окупаемость затрат на ГСУ при эффективном использовании привода (2-3 года). - Снижение части эксплуатационных затрат за счёт увеличения срока службы тормозной системы. 	<ul style="list-style-type: none"> - Большая стоимость гибридного автомобиля по сравнению с обычным ТС (больше на 15-20%). - Сложная конструкция ГСУ. - Недостаточно развитая инфраструктура (сервисное обслуживание). - Возможные трудности с сертификацией ТС с ГСУ.

Таблица 2. Характеристики гидравлических ГСУ

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> - Эффективность использования на тяжёлых ТС при движении в режиме stop-and-go. - Автоматическая бесступенчатая передача крутящего момента. - Высокий крутящий момент и большая мощность гидромотора при минимальных размерах и весе. - Эффективный процесс рекуперации энергии торможения. - Низкие потери энергии в гидроаккумуляторе (менее 2-5% из-за нагревания азота при сжатии). - Более быстрый процесс окупаемости, чем для электрического привода при использовании на городском транспорте. 	<ul style="list-style-type: none"> - Гидравлическая система малоэффективна при использовании на легковых ТС и движении с постоянной скоростью. - Низкий КПД по сравнению с механическим приводом для последовательной схемы. - Нежелательные явления, присущие гидроприводу во время работы (нагрев рабочей жидкости, утечки при высоких давлениях, высокие требования к чистоте рабочей жидкости).

Таблица 3. Характеристики электрических ГСУ

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> - Эффективность использования на легковых ТС при движении с постоянной скоростью. - Электродвигатели дешевле, проще в конструктивном отношении по сравнению с гидравлическим приводом. - Низкий уровень шума от работы ТС с электрической ГСУ. 	<ul style="list-style-type: none"> - Большая масса, низкая ёмкость, маленький срок службы аккумуляторной батареи. - Проблема быстрой зарядки батарей. - Низкая эффективность рекуперации энергии торможения по сравнению с гидравлическим приводом. - Пиковые нагрузки вызывают быстрый перегрев всего узла и потери энергии. - Высокая стоимость батарей и суперконденсаторов.

Слабым местом электрических ГСУ являются аккумуляторные батареи. Поэтому иногда в ГСУ используются суперконденсаторы, которые более энергоёмки и быстро заряжаемы. В них скорость зарядки не ограничена химическими процессами, как в аккумуляторах. Неоднозначно утверждение о маленьком сроке службы батарей, который может находиться в диапазоне 80-350 тысяч километров пробега.

Процесс преобразования энергии в ГСУ зависит от количества соединённых компонентов, а также от КПД каждого из них. На рис. 4 показаны КПД компонентов, входящих в состав параллельной электрической и гидравлической ГСУ.

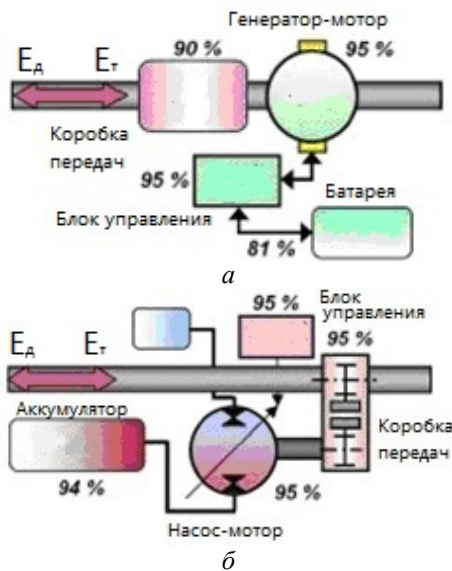


Рис. 4. Электрическая и гидравлическая ГСУ: а - электрическая система; б - гидравлическая система

КПД преобразования энергии для каждого компонента ГСУ выражен в процентах, где E_d - энергия движения, E_t - энергия торможения. КПД восстановления энергии при торможении может быть рассчитан, как отношение энергии, запасённой во время

торможения, к энергии, используемой для движения:

$$\frac{E_{T, зап}}{E_{d, исп}} = \eta_{эн. сохр.} \cdot \eta_{блок. упр.}^2 \cdot \eta_{н-м}^2 \cdot \eta_{кор. пер.}^2$$

где $\eta_{эн. сохр.}$ - КПД цикла сохранения энергии; $\eta_{блок. упр.}$ - КПД блока управления; $\eta_{н-м}$ - КПД насос-мотора; $\eta_{кор. пер.}$ - КПД коробки передач.

По расчётам КПД восстановления энергии для электрической системы – 0,53 оказался меньше, чем КПД восстановления энергии для гидросистемы – 0,69. КПД восстановления энергии для гидроаккумулятора составляет 94%. Для электроаккумулятора он составляет 81%, что является нормальным значением для литий-ионного аккумулятора.

Из табл. 4 видно преимущество гидроаккумуляторов по сравнению с электрической батареей.

Таблица 4. Сравнение характеристик гидроаккумулятора и электрической батареи

	Гидравлический аккумулятор	Электрические батареи (Li-ion)
Удельная мощность	5 кВт/кг	0,5 кВт/кг
Удельная энергия	4-11 кДж/кг	150 кДж/кг
КПД цикла	94%	81%

Преимущество гидравлических аккумуляторов заключается в их высокой удельной мощности и высоком КПД цикла. Это означает, что при рекуперации сохраняется большое количество энергии по сравнению с электрическими батареями. Низкий КПД цикла электрических батарей определяется требуемым временем их зарядки.

В электрических гибридах рациональнее использовать параллельную схему подключения компонентов, так как она обеспе-

чивает большую мощность для движения, с учётом недостатков современных батарей при движении в режиме «stop-and-go». При движении с постоянной скоростью (загородный цикл) более эффективно использовать электрические ГСУ. В гидравлических гибридах одинаково эффективно применять и последовательную, и параллельную схемы. Большой положительный эффект от использования гидравлических ГСУ наблюдается

при движении в режиме «stop-and-go» с большими нагрузками и работой в режиме холостого хода.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.3.2 «Проведение научных исследований целевыми аспирантами».

STATE OF THE ART ANALYSIS IN THE AUTOMOTIVE HYBRID DRIVES

© 2012 A. F. Sinyakov, A. G. Gimadiev, V. N. Ilukhin, V. Ya. Sverbilov

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The paper presents an analytical review of hybrid drives of vehicles.

Hydraulic hybrid, electric hybrid, energy recovery, fuel economy, emissions, analysis efficiency.

Информация об авторах

Синяков Антон Фёдорович, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: anfesin@gmail.com. Область научных интересов: гидравлический гибридный транспорт, исследование динамических характеристик гибридных систем.

Гимадиев Асгат Гатъятович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: gimadiev_ag@mail.ru. Область научных интересов: автоматика и регулирование двигателей летательных аппаратов

Илюхин Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: iwnik@yandex.ru. Область научных интересов: мехатроника и робототехника, исследование динамических характеристик цифровых регуляторов.

Свербилов Виктор Яковлевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: v.sverbilov@mail.ru. Область научных интересов: исследование динамики гидросистем.

Sinyakov Anton Fedorovich, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: anfesin@gmail.com. Area of research: hydraulic hybrid vehicles, dynamic characteristics of hybrid vehicles.

Gimadiev Asgat Gatjatovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Control Systems of Power Units, Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Ko-

rolyov (National Research University). E-mail: gimadiev_ag@mail.ru. Area of research: automatics and regulation of aircraft engine.

Iliukhin Vladimir Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Control Systems of Power Units, Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: iwnik@yandex.ru. Area of research: mechatronics and robotics, digital fluid power.

Sverbilov Victor Yakovlevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Control Systems of Power Units, Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: v.sverbilov@mail.ru. Area of research: dynamics of fluid power systems.