

ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ В ПРИВОДАХ МАШИН

HYBRID SYSTEMS IN THE PROPULSIONS OF MACHINES

Dr Ph. Eng. Lubnauer W. A.
Technical University of Lodz, Poland
E-mail: wlodzimierz.lubnauer@p.lodz.pl

Abstract: The paper presents applications of new solutions of hybrid propulsion systems in vehicles and heavy duty machines. These machineries utilize heterogeneous sources of energy; above all electrical or hydraulic ones which results in a diverse power transmission of propulsion structures in the mechanical system.

KEY WORDS: HYBRID VEHICLE DRIVES; MECHANICAL ENGINEERING, NECHANICS.



Рис.1. Шасси гибридной машины серии HySeries Drive™ - компания Ford®

1. Введение

Современная промышленность и мировое хозяйство требуют всё более и более энергетических сырьев. Их резервы медленно, но постоянно уменьшаются, а их цены непрерывно растут. Это относится таким сырьем как: каменный и бурый уголь, нефть и газ. Кроме того растёт запыление атмосферы и эмиссия в атмосферу вредных газов - продуктов сгорания термодинамических двигателей; в особенности окисав азота и углерода. В месте с новыми, мировыми обязательствами (нормы и законы: ECE, EURO I - EURO V, TLEV, SULEV и др.) идут прикладные технико-инженерские решения приводов автомобилей и машин. Одним из таких решений является гибридный привод, то есть привод многоисточниковый [1-6]. Проектированные, сейчас [3,4], а тоже в будущем, профессиональные гибридные системы приводов могут иметь большое влияние на разрешение проблем с увеличением требования нефти и других топлив. Кроме того гибридные системы причиняться до понижения загрязнения среды а тоже уменьшении в ней шума. Надо тоже иметь на виду, что понижение расхода топлив дает очень рациональные, экономические пользы – понижение стоимости эксплуатации. Актуально, приводов с гибридными системами, более чем других, находится а автомобилях [2]. Теперь, каждый большой автомобильный концерн продает автомобили с гибридным приводом.

Медленно, но постоянно в Европе и США, гибридные приводы применяется в рабочих машинах [7]. и других устройствах, (тоже военных) [12]; например:

фирма VOLVO сделала автобус - *Environmental Concept Bus* и городской грузовик – *Environmental Concept Truck*.

В Польше, в настоящие время, проектируется и строится гибридные машины (пока прототипы) в научно-инженерских коллективах, м. др.:

профессора А. Шумановского ТВУЗ, г. Варшава [6, 8, 9],
профессора З. Павельского ТВУЗ, г. Лодзь [4].

2. Основные гибридные системы приводов

Гибридные приводы (ГП) это такие системы трансмиссии мощности, которые имеют два или более источников энергии и два или более, разных приводов с двигателями. Из точки зрения источников энергии системы ГП могут иметь следующие двигатели:

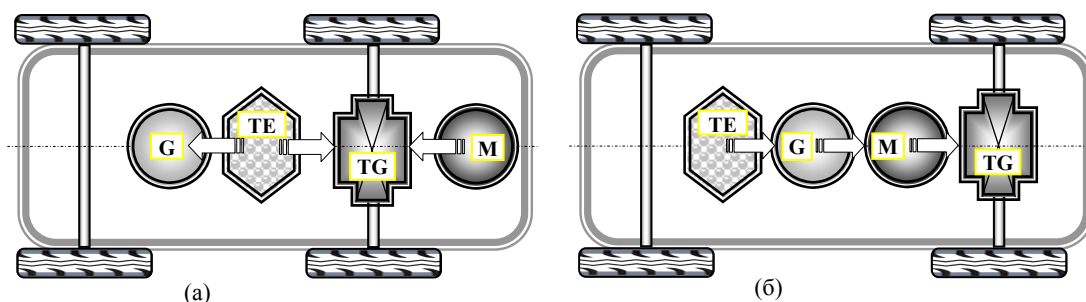
- поршневые или турбинные;
- электрические постоянного или переменного тока;
- гидравлические или пневматические;
- и очень редко паровые.

Отсюда следует, что идея приспособления ГП допускает оптимальный расход энергии [5, 10, 11].

На рис.2. представлена общая, компоновочная схема автомобильного ГП – кроме систем управления и аккумуляторов. Это термоэлектрический привод, больше всего использованная гибридная система трансмиссии мощности [3, 5]. Термодинамический двигатель (например: дизель) и электрический двигатель работают в этих приводах параллельно (рис.2а) или последовательно (рис.2б). Они сцеплены через планетарную муфту.

Такая конфигурация гибридной системы допускает:

- ☞ возможность ограничение количества передачи и муфт;
- ☞ исключение холостого хода двигателя внутреннего сгорания;
- ☞ использование электрического двигателя для генераторной работы или в режиме динамического тормоза;
- ☞ параллельный привод делает возможным суммирование мощности всех двигатели привода;
- ☞ гибридные системы облегчают разгон термодинамических двигатели.



(а)

(б)

Рис.2. Системы гибридных термоэлектрических приводов:

(а) параллельная гибрида (б) последовательная гибрида

M – электрический двигатель; TE – термодинамический двигатель; G – генератор; TG – планетарная передача

Таблица 1. Примеры автомобильных гибридных приводов

Марка компания	Система гибриды	Масса [кг]	Термический двигатель [кВт]	Электрический двигатель [кВт]	Тип аккумулятора напряжение [В]	Динамика [км/ч] в [сек]
Volvo EEC	параллельная	1550	газовая турбина 39	индукционный 70	NiCd 600	0 -100/13
VW Golf <i>protonium</i>	параллельная	1210	бензин 44	индукционный 7	NiCd 72	0 -60/8,5
BMW 581	параллельная	1730	дизель 69	индукционный 30	NiCd -	0 -50/5,5
Mitsubishi	последовательная	3330	бензин 20	индукционный 2x40	Pb 336	0 -40/5,5
Audi Duo	параллельно-последовательная	1800	бензин 170	синхронический 21	NiCd 250	-
Toyota Prius	параллельная	1300	бензин 33; 43; 57	трёхфазный с постоянными магнитами 30	NiMh 201	0 -100/11

Системы гибридных приводов требуют особенных, специализированных схем управления, которые могут обеспечить безаварийную и оптимальную работу всех энергетических узлов ГП. Осуществление такой задачи есть возможно только при помощи микропроцессорных схем, часто использующих каноны размытой логики (*нечеткость - Fuzzy Logic*).

На рис.3. представлена принципиальная схема архитектуры управления гибридными приводами.

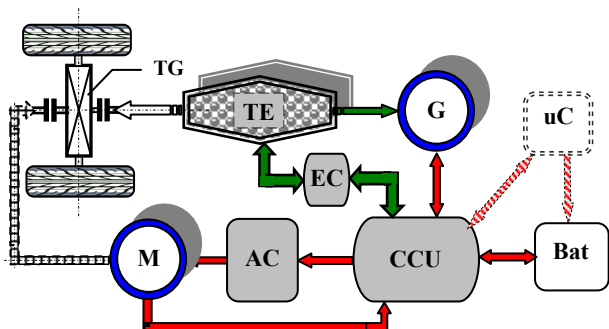


Рис.3. Принципиальная схема архитектуры управления ГП

Где введено следующие обозначения:

- TE - термодинамический двигатель;
- М - электрический двигатель;
- G - генератор напряжения;
- CCU - главный, управляющий компьютер;
- AC - энергетический преобразователь питания двигателя М;
- EC - система управляющая термодинамическим двигателем;
- Bat - аккумуляторная батарея;
- uC - батарея ультраконденсаторов, опционально [8];
- TG - планетарная передача с муфтами.

В гибридных приводах принимаются следующие термодинамические двигатели **ТЕ**:

- ♦ поршневые, внутреннего сгорания;
- ♦ с самовоспламенением, прежде всего дизели;
- ♦ газовые турбины.

В ходе исследований ГП в конце XX-ого столетия, были наилучше разработаны три различных типа электрических двигателей **М** [11], которые отличаются по структуре и функциональным возможностям:

- ♦ двигатели постоянного тока;
- ♦ асинхронный двигатели;
- ♦ синхронный двигатели.

Сейчас принимается, что самым лучшим электрическим двигателем для ГП является трёхфазный синхронный двигатель с постоянными магнитами.

В таких электромеханических схемах управление двигателями разрешается на основании информации (сигналов) полученных из многих датчиков расположенных во всей системе ГП.

На датчики сигналов и обратной связи, тут приспособляется всё чаще резолверы [7]. Они обеспечивают привод информацией о скорости вращения и положении вала двигателя а также о перемещениях других механизмов работающих в приводной системе. Резолверы особенно предназначены для использования с приводами, работающими в режиме замкнутого контура. На рис.4. представлено вид и схему одного из типов резолверов.

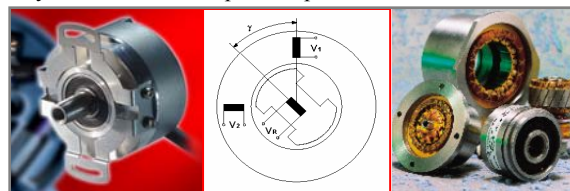


Рис.4. Резолвер углового перемещения и его схема

Чертой, которая отличается контуры управления ГП от схем управления обыкновенными приводами является необходимость распределения разных энергетических потоков среди частных элементов целого гибридного привода.

Такую задачу можно осуществить только компьютерным методом, потому что надо быстро преобразовывать очень много информационных сигналов о состоянии ГП – о настоящем режиме его работы.

3. Электроника контуров управляющих ГП

Говоря об электронике контуров управляющих ГП надо иметь ввиду связи между различными областями и модульным компонентом этой системы. Самую большую роль играет центральный компьютер системы (Center Control Unit – CCU). Он получает многие сигналы из всех контуров управления ГП:

- ☞ который двигатель нужен сейчас работать;
- ☞ информации о состоянии двигателей: М и ТЕ;
- ☞ об ускорении или торможении системы;
- ☞ об состоянии силовой электроники;
- ☞ о температурах в действительных точках системы;
- ☞ о зарядке аккумуляторов и/либо ультраконденсаторов.

Центральный компьютер системы ГП управляет главными, энергетическими контурами электрического двигателя, прежде всего преобразователями частоты (иначе – частотно-регулируемый электропривод), через которые питается эти двигатели. В этом случае регулирование скорости вращения электродвигателя переменного тока производится путем изменения частоты и величины напряжения питания двигателя. Коэффициент полезного действия КПД такого преобразования составляет около 98%, из сети потребляется практически только активная составляющая тока нагрузки. Микропроцессорная система управления обеспечивает высокое качество управления электродвигателем и контролирует множество его параметров, предотвращая возможность развития аварийных ситуаций.

На рисунке 5 показан состав силовой части такого преобразователя: входной неуправляемый выпрямитель - звено постоянного тока с LC-фильтром и автономный инвертор напряжения с широтно-импульсную модуляцию.

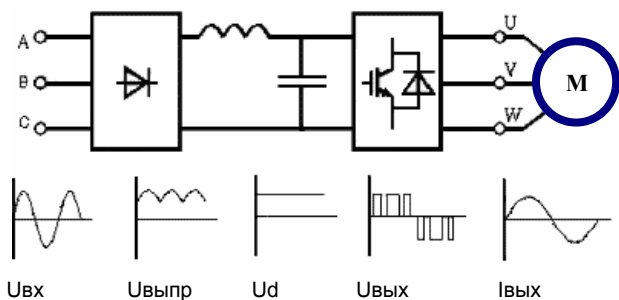


Рис.5. Преобразователь и диаграммы напряжений и токов.

Современные блоки преобразователи построены при использовании новейшей электроники: быстрых тиристоров GTO и силовых транзисторов IGBT, как видно в примере на рисунке 6.

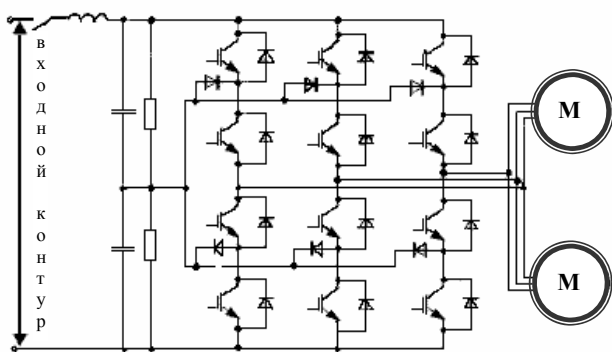


Рис.6. Схема тягового привода с двумя двигателями, системы ONIX 3000 на IGBT транзисторах электровоза AM96 для системы электроснабжения 3 кВ.

На сегодняшний день IGBT как класс приборов силовой электроники занимает, и будет занимать доминирующее положение для диапазона мощностей от единиц киловатт до единиц мегаватт [6, 7, 11].

Многолетний опыт эксплуатации тиристорных преобразователей частоты показывает, что их использование позволяет:

- ☞ повысить производительность и энергетическую эффективность производства за счет экономичного регулирования производственных приводов и механизмов;
- ☞ сохранять приводные электродвигатели и механизмы от ударных пусковых моментов;
- ☞ защитить питающие сети и аккумуляторы от больших пусковых токов;
- ☞ эксплуатировать приводы в системах со слабыми сетями;
- ☞ существенно экономить энергию системы ГП.

Гибридные приводы имеют различный конструкционный вид, но они все должны иметь возможность торможения приводного двигателя с рекуперацией (возвратом) энергии в питающую сеть. Потому они снабжены в аккумуляторные батареи (таблица 1) и опционально в ультраконденсаторы [8], как это указано на рис.3. ГП имеют систему батарей, не требующих внешней подзарядки и долго работающих без замены. Новые типы аккумуляторных [10] батарей зачастую характеризуются весьма хорошими параметрами - высокой плотностью энергии, числом циклов заряд/разряд.

Там используются разные их типы:

- кислотно-свинцовые - Pb;
- никель металлгидридные - NiMH;
- никель-кадмиевые - NiCd;
- литий ионные - Li-Ion.

Сейчас литий ионные аккумуляторы достигают всё больше энергетические ёмкости на единицу своей массы - рис.7.

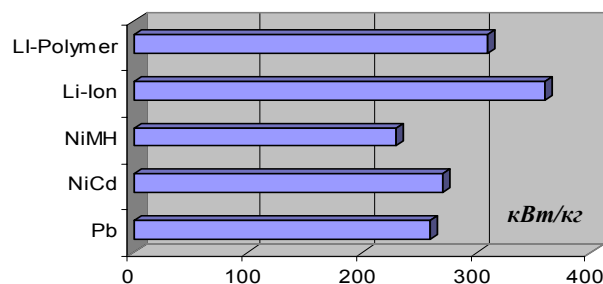


Рис.7. Стандартные величины единичной мощности для разных типов батарей относительно их массы

Зарядка приводных аккумуляторных батарей идёт сразу с двух сторон - от генератора напряжения с двигателем внутреннего сгорания или дизелем, и от колёс (при торможении) через электродвигатель, работающий генераторным методом - рис.3. Тут нужно упомянуть, что это всё происходит в "интеллектуальной", управляемой компьютером тяговой электросети системы ГП.

Гибридные приводы опционально могут быть оборудованы ультраконденсаторами - рис.8. Ультраконденсатор (уС) сохраняет энергию по принципу электрического поля между двумя проводящими элементами. Теоретически, он может быть заряжен менее, чем за секунду, и его можно будет использовать многократно без потерь энергии. Сейчас, по крайней мере, две компании занимаются разработкой ультраконденсаторов - это EESstor в Техасе и Maxwell Technologies в Калифорнии. Используя обширные знания по материаловедению и прикладной физике сделано ультраконденсаторы, в которых в качестве диэлектрика используется титанат бария, достигающие ёмкость нескольких тысяч фарад ёмкости при напряжении 2,5 В. Это позволило добиться высокой плотности энергии - 280 ватт-часов на килограмм. Их мгновенная плотность мощности достигает 5 кВт/кг. Для сравнения, у литиево-ионных батарей этот показатель составляет 120 Вт/кг. Они идеально могут работать буфером, снабжают энергией с маленькой постоянной времени и идеально подходят для задач, в которых требуются повторяющиеся пики нагрузки длительностью от долей секунды до нескольких минут. На рис.9. представлена диаграмма теста ультраконденсатора [8].



Рис.8. Виды ультраконденсаторов

На рис.9. представлена диаграмма теста ультраконденсатора [8].

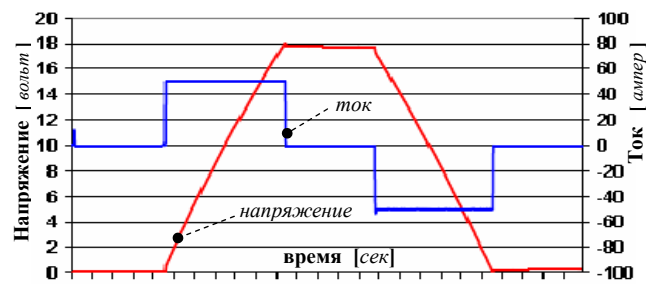


Рис.9. Лабораторный тест ультраконденсатора 10Ф/500В

4. Применение ГП в транспортных машинах

В наше время - время бурного роста силовой электроники работы над совершенствованием ГП является весьма полезными, так как позволяет удачные технические решения реализовывать это в других типах транспортных машин. Теперь появились следующие области, кроме автомобилей, которые применяют системы ГП:

1. Автотранспорт: автобусы и городской грузовой транспорт;
2. Электропоезды, метро, трамваи гибридного типа;

3. Тяжёлые рабочие машины (ТРМ) для строительных и горных работ - колёсные экскаваторы и транспортеры, отвальные плуги и др.;
4. Военное применение гибридных электроприводов; приводы для броневиков и объектов бронетанковой техники (БТТ) - танков и транспортеров - варианты колесные и гусеничные.

Последующие совершенствования ГП стало причиной, что в новейших типах машин каждое колесо вращает электромотор. На рис.10. представлена общая схема такого ГП для машин типа ТРМ и БТТ, имеющих привод 4x4 (могут быть 6x6 или 8x8).

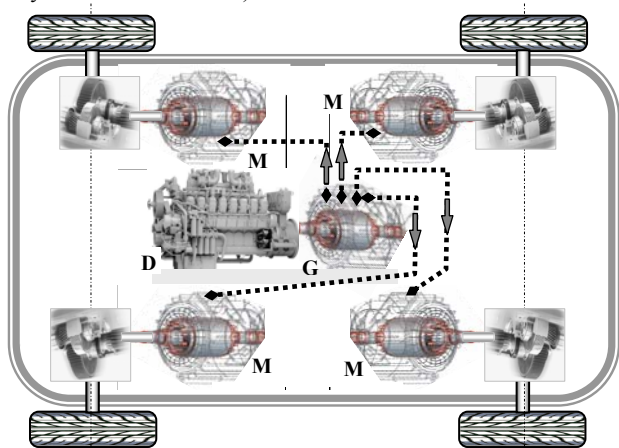


Рис.10. Общая схема ГП 4x4 для машин типа ТРМ и БТТ
M - электродвигатель; D – дизель; G - генератор

Такие приводы имеют например – рис.11.:

1. броневой гусеничный транспортер пехоты MARDER с ГП 2x2 или колесный VT с ГП 8x8 германской фирмы Magnet-Moto, которые сделаны в порядке программы „Перспективные Боевые Системы” (FCS - Future Combat System's) [12];
2. самосвал американской компании „Liebherr T282B”, имеющий турбодизель MTU DD 20V4000 фирмы MTU Friedrichshafen GmbH, мощности 2,722 МВт и объёма цилиндров 90 литров. Электрический привод и генератор изготовила General Electric, США и компания Siemens с Германии [13].



Рис.11. Гибридные, броневые транспортеры фирмы Magnet-Moto и самосвал Liebherr T282

Эти машины очень интересны потому, что в каждое колесо машины встроен электромотор. Они размещены в ступицах колес и составляют вместе один рабочий элемент, могущий исполнять роль: двигателя, электродинамического тормоза и электрогенератора, заряжающего батареи аккумуляторов или ультраконденсаторов. Рисунок 12 показывает такое колесо.

4. Заключение

Проблемы окружающей среды всё больше волнуют не только профессиональных экологов, но и людей самых разных специальностей. Активная борьба экологических общественных организаций, как и всего мирового сообщества, за чистоту воздуха и уменьшение вредных выбросов содействуют принятию законодательных мер по расширению

производства автомобилей и других машин уменьшенным потреблением углеводородного топлива и улучшению

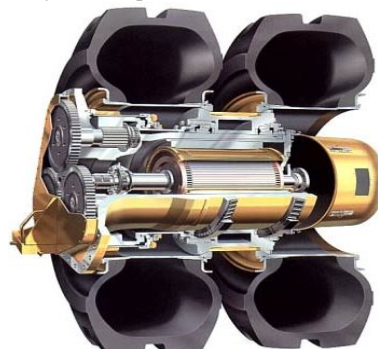


Рис.12. Электрический привод с двигателем в ступице колеса фирмы **Driver System** General Electric, США
Может работать с нагрузкой 150 тонн.

экологичности различных типов двигателей. Это стало очень важным экономически после арабского нефтяного эмбарго. Потому представляется более реальным широкое применение в ближайшие 5-10 лет машин с гибридными приводами. ГП может оказаться оптимальным компромиссом между экологией (удовлетворение требований законов SULEV), экономикой и национальной безопасностью (в смысле сокращения потребления нефти и зависимости от её импорта).

5. Литература

- [1] Badin F., Jeanneret B., Harel F., Trigui R., Les véhicules hybride. Congrès scientifique, Véhicules Propres dans les Transports Urbains, La Rochelle, 2000.
- [2] Badin F. Véhicules hybrides, quels objectifs, quels moyens pour y parvenir ? Cereveh Centre d'Etudes et de Recherches sur les Véhicules Electriques et Hybrides: “Quels véhicules hybrides pour quoi faire?”, Paris, France 23 Nov 2004, с. 6-16.
- [3] Szczotka M., Modelowanie ruchu pojazdu z uwzględnieniem różnych układów przeniesienia napędu, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała, *докт. диссерт.* 2004., с.143
- [4] Pawelski Z., Modelowanie i obliczanie napędu hydrobusu. Monografie Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000, с. 134.
- [5] Krasucki J., Analiza energetyczna wieloźródłowych zespołów napędowych metodą symulacji cyfrowej, Politechnika Warszawska, *докторская диссертация.* 1993.
- [6] Szumanowski A., Hybrid Electric Vehicle Drive Design, ITEE, Book, Radom 2006, с. 296
- [7] Lubnauer W. A.: „Napędy hybrydowe w ciężkich maszynach roboczych”, 6nd Conference „Postępy w Elektrotechnice Stosowanej” PES-6, 18-22 June 2007, Poland
- [8] Piórkowski P., Szumanowski A., Chang Y., Ultrakondensatory w hybrydowych układach napędowych. XX Konferencja Naukowa „Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych”, Zakopane 22-25 Jan. 2007, *мат. на CD-ROM.*
- [9] Szumanowski A., Hajduga A. „Optimization Series HEV Drive Using Modelling and Simulation Methods” IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf., Windsor, 6-8 Sept. 2006.
- [10] Piórkowski P., Badania efektywności akumulowania energii w hybrydowych napędach pojazdów, Politechnika Warszawska; *докторская диссертация.* 2004.
- [11] Chrzan P. J., Nieznański J., Szczyński R., Sterowanie silnika indukcyjnego w hybrydowym napędzie samochodowym, III Conf. „Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym” – SENE 97, 12-14 Nov.1 997, Łódź, с. 75-81
- [12] Информация фирмы: L-3 Communications Magnet-Motor GmbH, „Electric propulsion systems in military vehicles”, Starnberg, Германия, 2000
- [13] Каталог „Mining Truck T282B”, издательство Liebherr Mining Equipment Co. Newport News, США, 2004 с.14

**) ВНИМАНИЕ: Все названия фирм, компаний, их продуктов цитированные в сей статье являются их собственностью и употребленные только информационно и для научной цели.*