

МОСКОВСКИЙ  
АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)

К.Л. БОГДАНОВ

# **ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АВТОМОБИЛЯ**

МОСКВА 2009

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного автомобилестроения связано с решением ряда задач.

Автомобиль, ставший массовым средством транспорта, является одновременно главным источником экологического загрязнения окружающей среды, что приводит к необходимости принятия мер по снижению токсичности и объема выброса в атмосферу отработавших газов.

Расширение масштаба открытых разработок, строительства магистральных газопроводов и соответствующее увеличение грузоподъемности большегрузных автомобилей сопровождаются трудностями передачи мощности от теплового двигателя к ведущим колесам.

Решение отмеченных задач требует применения нового подхода к выполнению современных автомобильных передач с рассмотрением вопросов технического и экологического характера, одним из направлений которого является разработка и внедрение систем тягового электрического привода.

В настоящее время в решении данного вопроса накоплен значительный опыт как в отечественной, так и в зарубежной практике, техническая информация о котором использована при написании настоящего пособия.

Учебное пособие соответствует программе дисциплины «Электрический привод» и предназначено для подготовки к изучению специальных дисциплин по электрооборудованию автомобилей.

Ограниченность объема пособия не позволяет подробно рассмотреть вопросы программы дисциплины. Для более полного их изучения могут быть использованы источники из предложенного списка литературы, а также учебные и методические пособия автора «Основы тягового электропривода» (ч.1,2), «Электронные и электрические системы автоматизированного электропривода автомобиля» и методические указания к курсовому проектированию по дисциплине «Автоматизированный электропривод».

Настоящее пособие может быть использовано также студентами специальности «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» при изучении вопросов электропривода дорожно-строительных машин.

## **1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ АНАЛИЗА СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА АВТОМОБИЛЯ**

### **1.1. Теоретические и методические основы анализа систем тягового электропривода автомобиля**

Электропривод, предназначенный для тяги, называется тяговым электроприводом (ТЭП). Такой электропривод находит применение, например, в железнодорожном, водном, городском и промышленном транспорте. Тяговый электропривод автомобиля (ТЭА) является одним из видов тягового электропривода транспортных средств (ТС).

Анализ систем ТЭА производится на основе общей теории электропривода и методов расчета систем тягового привода автомобильного транспорта. Наиболее обобщенным принципом анализа передающих систем является закон сохранения энергии, на базе которого основаны частные теоретические и методические положения, использованные для анализа и исследования режимов работы систем ТЭА.

#### **1.1.1. Теория силового потока**

Теория силового потока (ТСП), основанная на принципах закона сохранения энергии, рассматривает однонаправленную её передачу от источника к потребителю в форме мощностного фактора. Так как развиваемый двигателем момент и потребляемая от источника энергия автоматически меняются с изменением условий работы и величины сопротивления движению, представляется целесообразным введение понятия встречного силового потока сопротивления движению (потока реакции «опоры»). В предлагаемом аспекте в передающей системе функционируют два силовых потока – движущий и поток сопротивления движению, силовые факторы которых имеют аналогичные названия и обозначения.

В представленной на рис. 1.1 упрощенной структурной схеме ТЭП:

- $P$  и  $P_c$  - мощностные факторы движущего потока и потока сопротивления движению;
- $M_{вр}$  и  $F_t$  - силовые факторы движущего потока;
- $M_c$  и  $F_c$  - силовые факторы потока сопротивления движению.

Рассмотрение упрощенной схемы взаимодействия отдельных элементов передающей системы позволяет одновременно определить «функциональные» понятия их основных характеристик.

Так как основными назначениями электродвигателя являются создание вращающего момента и реализация движения исполнительного механизма за счет энергии вырабатываемой в преобразовательном устройстве ТЭП, то воздействие электродвигателя на исполнительный механизм может быть представлено мощностным движущим потоком и соответствующими ему силовым и скоростным факторами. Реакция исполнительного механизма на величину скоростного фактора определяется механической характеристикой исполнительного механизма в форме зависимости  $M_c(\omega)$  или  $F_c(V)$ . Обратное воздействие силового фактора  $M_c$  на электродвигатель определяет функциональную зависимость  $\omega_{эд}$  (Мэд), соответствующую механической характеристике электродвигателя. На рис. 1.2 представлены исходные базовые характеристики элементов разомкнутой системы, а на рис. 1.3 - замкнутой системы ТЭА. На рис. 1.4 приведена также схема силового потока в системе с гидравлическим приводом.

### 1.1.2. Теория характерных процессов

Теория характерных процессов (ТХП) находит применение при исследовании процессов в системах автоматического регулирования различного назначения, в том числе и в системах электрического привода, как методический инструмент их анализа при воздействии на объект регулирования возмущающего и управляющего сигналов.

Для проведения анализа процессов изменения скорости тягового электродвигателя (скорости движения автомобиля) классифицируем их следующим образом.

1. Процесс естественного изменения скорости тягового электродвигателя (первый процесс) как процесс автоматического ее изменения электродвигателем при изменении нагрузки на валу ЭД (сопротивления движению автомобиля).

2. Процесс регулирования скорости тягового электродвигателя (второй процесс) как процесс автоматического ее изменения двигателем при принудительном воздействии на тот или иной элемент электрической цепи водителем или автоматическим устройством, рассматриваемый при постоянном значении нагрузки на валу ЭД (сопротивления движению автомобиля).

Указанные процессы являются составной частью двух основополагающих характерных процессов, протекающих в ТЭА – первого характерного процесса (ПХП) и второго характерного процесса (ВХП).

В тяговом электроприводе оба характерных процесса протекают обычно одновременно, т.е. имеет место синтез двух характерных процессов (СХП).

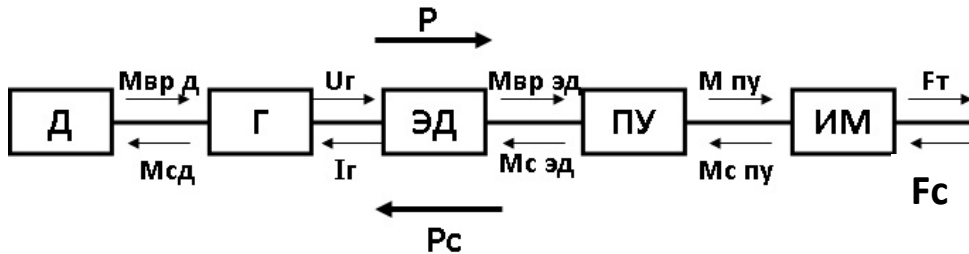


Рис. 1.1. Силовые потоки ТЭП

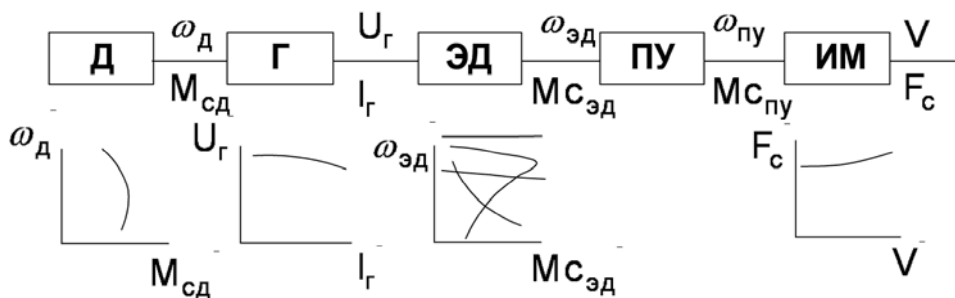


Рис. 1.2. Базовые характеристики элементов ТЭП (разомкнутая система)

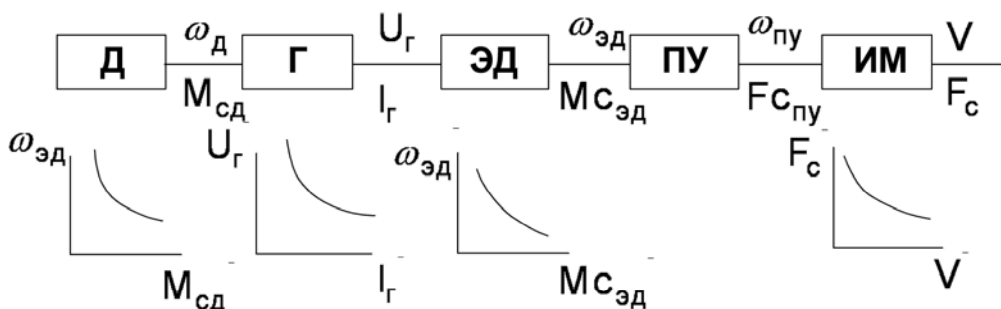


Рис. 1.3. Базовые характеристики элементов ТЭП (замкнутой системы)

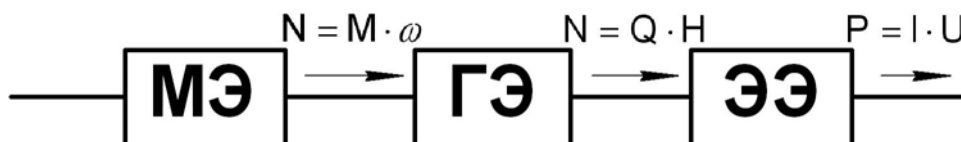


Рис. 1.4. Силовой поток в системе с гидравлическим приводом

При синтезе характерных процессов рабочая точка перемещается (в статике) как по заданной механической характеристике, так и в вертикальном направлении. В итоге имеет место серия (семейство) механических характеристик.

Рассмотренные выше два характерных процесса могут быть условно отнесены к первому характерному процессу в замкнутой

системе как процессу, лежащему в основе определения понятия механической характеристики ТЭД в замкнутой системе и возникающему при действии возмущения типичного для первого характерного процесса.

Одновременно имеет место регулирование скорости движения водителем (автоматом), осуществляемое независимо от величины нагрузки. Принципиальное отличие данного процесса регулирования скорости тяговых электродвигателей (второго характерного процесса в замкнутой системе) от процесса изменения параметров с целью формирования новой механической характеристики заключается в возможности получения различных значений скорости ЭД при постоянном значении величины момента сопротивления. Воздействие водителя при этом является внешним воздействием.

Практически работа системы происходит при одновременном протекании двух характерных процессов, определяющих скорость движения автомобиля. Водитель задает характеристику элементов привода в замкнутой системе, перемещение точки по которой определяется силой (моментом) сопротивления движению. Водитель регулирует скорость движения автомобиля, а она устанавливается в соответствии с сигналом, поступающим от водителя, и нагрузкой тягового электродвигателя.

Применение ТХП к системам ТЭП рассмотрено ниже, где анализ процессов и примеров движения рабочей точки с координатами  $\omega, M_c$  в замкнутой системе ТЭА представлены для ТЭП большегрузного автомобиля. На рис. 2.5 приведены примеры характерных процессов в ТЭП БА, где ПХП и ВХП – соответственно первый и второй характерные процессы в разомкнутой системе, а СХП – синтез характерных процессов в замкнутой системе ТЭП.

## **2. ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АВТОМОБИЛЯ С ОДНОТИПНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ**

### **2.1. Электромобиль**

Простейшим конструктивным решением ТЭП автомобиля с однотипной энергетической установкой (ЭУ) является привод электромобиля (ЭМ), содержащий в составе силовой цепи источник энергии, электродвигатель и механическую трансмиссию. Преобразовательное, электродвигательное и передаточное устройства ТЭП ЭМ по своему функциональному назначению подобны аналогичным устройствам автомобиля с ДВС.

### 2.1.1. Структурная схема ТЭП электромобиля

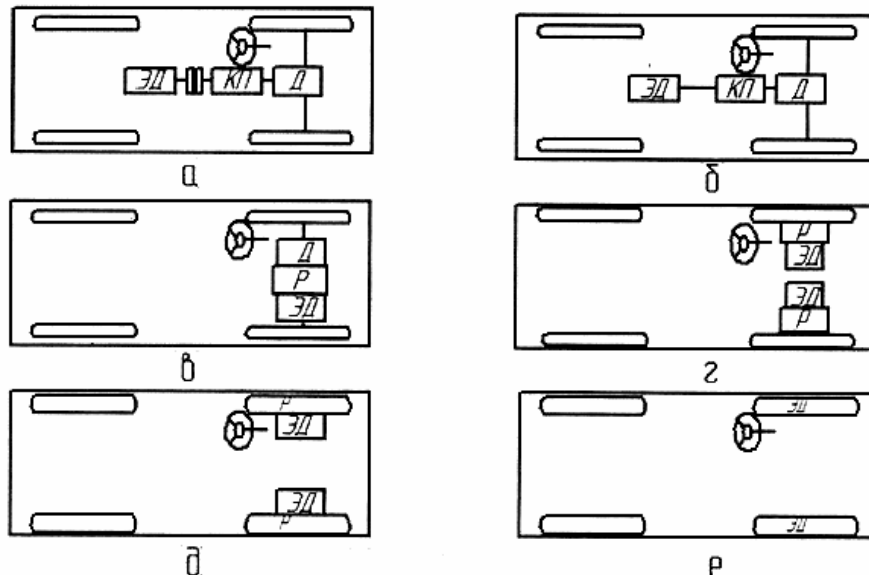
Современный ЭМ имеет достаточно совершенную структуру и удовлетворяет требованиям эксплуатации, соответствующим его конкретному назначению. Эксплуатация электромобиля не сопровождается загрязнением воздуха (выделением токсических веществ).

Транспортные средства с КЭУ, которые используют два источника мощности, обладают преимуществом перед ЭМ по дальности перевозок, но не решают полностью вопросов экологии. Алгоритм функционирования таких систем достаточно сложен и при анализе может быть разделен на алгоритмы отдельных режимов, часть которых аналогична режиму работы автомобиля с однотипной энергоустановкой (в том числе электромобиля).

Представленный ниже анализ проведён применительно к автомобилю с обобщенной структурной схемой ТЭП, выполненной на базе конструктивного исполнения трансмиссии электромобиля (рис.2.1) и соответствующего схеме электрической части привода силового электронного преобразователя, работающего в режиме энергоснабжения от однотипной энергетической установки.

### 2.1.2. Варианты конструктивного исполнения ТЭП электромобиля

Конструктивное исполнение тягового электропривода электромобиля может иметь несколько вариантов. Основные из этих вариантов представлены на рис. 2.1.



Д- дифференциал; КП- коробка передач; ЭД- электродвигатель; Р- редуктор.

Рис. 2.1. Варианты конструктивного исполнения ТЭП ЭМ

На рис. 2.1,а изображен ТЭП, состоящий из электродвигателя, сцепления, коробки передач и дифференциала. Сцепление и коробка передач могут быть заменены автоматической коробкой передач. Сцепление используется для соединения и разъединения электродвигателя с ведомыми колесами. Коробка передач обеспечивает ряд передаточных отношений, чтобы изменять вращающий момент на колесе автомобиля. Дифференциал - механическое устройство (ряд планетарных механизмов), обеспечивающее движение транспортного средства на поворотах.

На рис. 2.1,б изображен ТЭП для ЭМ с электродвигателем постоянной мощности в большом диапазоне скорости. Эта конструкция не только уменьшает размер и массу механической передачи, но и упрощает контроль за тягой, так как исключает необходимость переключения передачи.

На рис. 2.1,в изображен ТЭП, в котором электродвигатель, неподвижная передача и дифференциал объединены в единую конструкцию.

На рис. 2.1,г изображен ТЭП, в котором механический дифференциал отсутствует и заменен двумя двигателями. Каждый из них вращает одно колесо и обеспечивает различные скорости, когда транспортное средство движется по извилистой трассе.

На рис. 2.1,д изображен тяговый электродвигатель, который встроен в колесо. Это так называемый “мотор-колёсный” привод.

На рис. 2.1,е изображен ТЭП, в котором полностью отсутствует механическая передача между электродвигателем и ведущим колесом, и ротор электродвигателя непосредственно связан с ведущим колесом. Изменение скорости электродвигателя эквивалентно изменению скорости колеса и скорости транспортного средства. Однако это расположение требует, чтобы у электродвигателя был высокий вращающий момент.

### **2.1.3 Функциональная схема ТЭП электромобиля**

В основу построения функциональной схемы ТЭП электромобиля может быть положена схема ТЭП ЭМ, представленная на рис. 2.2 и состоящая из трёх основных частей: силовой цепи ТЭП, энергетического блока и блока вспомогательного оборудования.

- Силовая цепь ТЭП включает в себя электронный блок управления, силовой электронный блок, электрическую машину, механическую трансмиссию и колёса.

- Энергетический блок содержит основной источник энергии, дополнительный источник энергии и блок управления энергией.



- Вспомогательный служебный блок включает в свой состав блок электропитания, усилитель рулевого управления и блок контроля за климатическими условиями.

Создаваемые при перемещении педалей хода и торможения сигналы поступают на вход электронного блока управления и далее на силовой электронный преобразователь, управляющий работой электромашинной части привода. Представленная схема соответствует в основном современному исполнению ТЭП электромобиля.

В плане его предшествующего развития, на первом этапе, при простоте устройств управления в силовой части привода имели место большие потери энергии, незначительный запас хода и низкие качественные характеристики процесса управления, что явилось причиной разработки более совершенных систем ТЭП ЭМ с использованием достижений электронной техники.

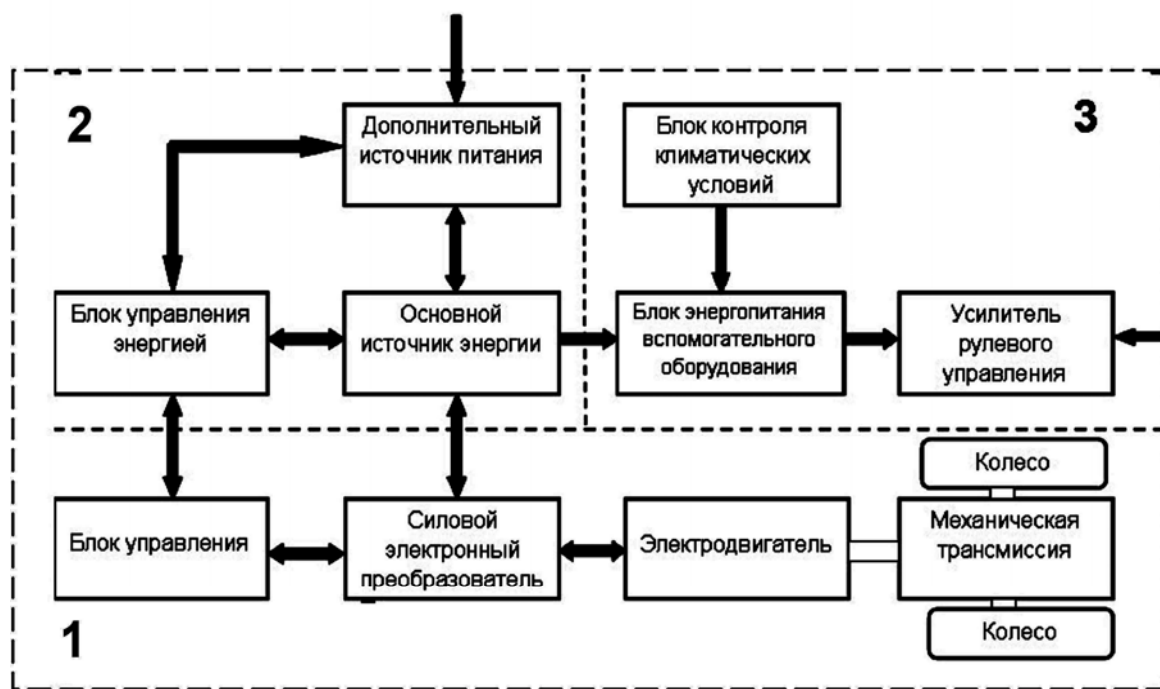


Рис. 2.2. Функциональная схема ТЭП ЭМ:  
1 - силовая цепь ТЭП; 2 - энергетический блок; 3 - блок вспомогательного оборудования

Для второго этапа развития тягового привода электромобилей характерно применение полупроводниковых преобразователей энергии. Первоначальное применение на данном этапе получил тяговый привод постоянного тока с тиристорным преобразователем в якорной цепи двигателя, а в дальнейшем – регулирование магнитного потока с помощью транзисторного преобразователя в цепи обмотки возбуждения.

Перспективным направлением в развитии ТЭА ЭМ является применение двигателей переменного тока и электронных преобразователей частоты.

## **2.2 Тяговый теплоэлектрический привод автомобиля**

К электроприводам с однотипной энергетической установкой относится и тяговый теплоэлектрический привод автомобиля, области применения которого непрерывно расширяются. В настоящее время он проектируется для многих транспортных средств, в том числе: автосамосвалов и автопоездов, многоосных автомобилей повышенной проходимости с активным приводом прицепов, специальных автомобилей и автомобилей для пассажирских перевозок средней грузоподъемности.

### **2.2.1 Тяговый электропривод большегрузных автомобилей**

Освоение труднодоступных районов страны требует создания высокопроизводительных пневмоколесных транспортных средств повышенной проходимости и грузоподъемности. Практика автомобилестроения показывает, что для тягового электропривода большегрузных автомобилей (ТЭП БА) наиболее перспективен теплоэлектрический привод и его конструктивная модификация – дизель-электрический привод, в состав которых входят двигатель-генераторная установка (Д-Г) и мотор-колеса (М-К).

ТЭП БА должен обеспечить:

- формирование тяговых и тормозных характеристик и их автоматическое ограничение;
- реализацию полной свободной мощности теплового двигателя в соответствии с предельными характеристиками и параметрами электрооборудования;
- формирование частичных тяговых характеристик ТЭД при использовании части свободной мощности теплового двигателя в режиме наибольшей экономичности;
- требуемый диапазон регулирования скорости движения автомобиля;
- стабилизацию заданного значения мощности теплового двигателя путем формирования гиперболической формы внешней характеристики преобразовательного устройства ТЭП.

### **2.2.2. Структурные схемы ТЭП БА**

ТЭП БА может быть выполнен на постоянном, переменном-постоянном и переменном токе. Силовая цепь ТЭП постоянного тока имеет генераторы и тяговые двигатели постоянного тока, а

ТЭП переменного-постоянного тока - тяговые двигатели постоянного тока, питание которых осуществляется от генераторов переменного тока через полупроводниковые выпрямители. В ТЭП переменного тока применяются генераторы и тяговые двигатели переменного тока, скорость которых регулируется статическими преобразователями частоты.

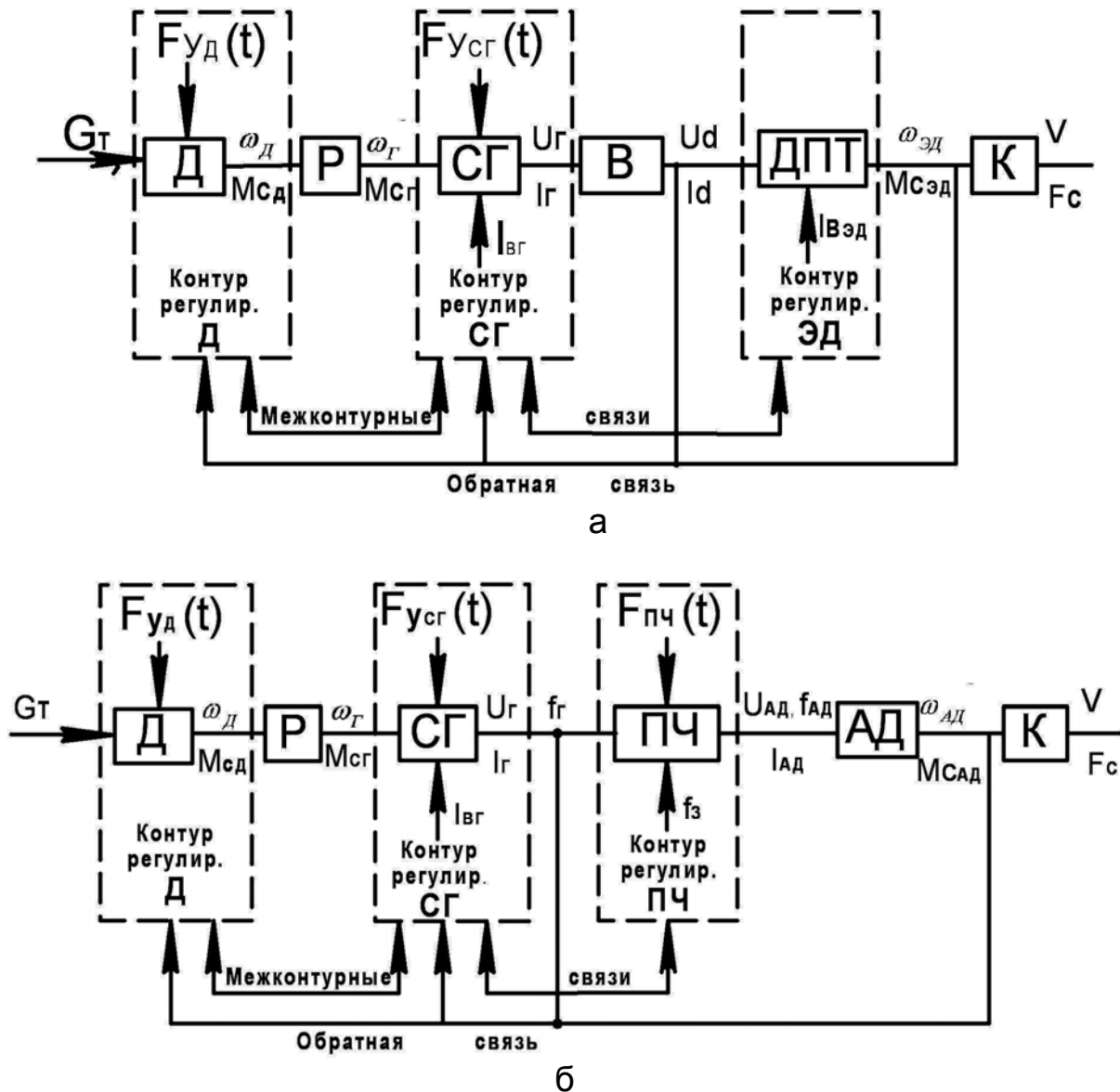


Рис.2.3. Структурная схема привода: а- переменного-постоянного тока; б- переменного тока

Наиболее перспективными исполнениями ТЭП БА являются приводы переменного-постоянного и переменного тока, упрощенные структурные схемы которых представлены на рис. 2.3 а, б.

Элементами силовой цепи структурной схемы ТЭП переменного-постоянного тока являются тепловой двигатель (Д), редуктор (Р),

синхронный генератор (СГ), выпрямитель (В), тяговый двигатель постоянного тока (ДПТ) и колесо автомобиля.

В аналогичной осевой цепи структурной схемы ТЭП переменного тока (дополнительно к отмеченным выше элементам) представлены преобразователь частоты (ПЧ) и асинхронный двигатель (АД).

В структурных схемах показаны (в общем виде) контуры регулирования основных компонентов силовой цепи с входными сигналами внешних управляющих воздействий и межконтурных связей, а также обратных связей по скоростному и силовому факторам мощностных потоков.

### 2.2.3. Принципы функционирования ТЭП БА

Управление движением автомобиля производится с помощью педали хода и торможения.

Тяговый режим работы включает в себя следующие этапы движения:

- разгон;
- движение по механической характеристике;
- установившееся движение;
- тормозной режим.

Все этапы движения реализуются в замкнутой системе ТЭП под контролем работы автоматической системы управления.

Принцип выполнения отдельных контуров генератора, двигателя постоянного тока, синхронного генератора, преобразователя частоты и асинхронного двигателя представлен в списке литературы, п.4.

Анализ функционирования обратных связей по стабилизации заданного значения мощности (формирования гиперболической формы механической характеристики ТЭД) выполнен применительно к обобщенной функциональной схеме ТЭП БА, представленной на рис. 2.4.

В состав функциональной схемы входят тепловой двигатель (Д), генератор (Г), тяговый электродвигатель (ТЭД) и колесо автомобиля (К), а также элементы обратных связей по току и напряжению генератора – датчики тока (ДТ) и напряжения (ДН), блок мощности (БМ) и усилитель (У).

В рассматриваемой схеме входным параметром блока теплового двигателя (Д) является расход топлива  $G_T$ , в зависимости от которого находится мощностной фактор движущего силового потока, а выходным – скоростной фактор  $\omega_D$ . За входной параметр Д со стороны трансмиссии принимается момент сопро-

тивления  $M_{сд}$  – силовой фактор потока сопротивления движению, пропорциональный моменту генератора. Напряжение  $U_{г}$  и ток  $I_{г}$  генератора (скоростной и силовой факторы силового потока) являются входными параметрами сигналов обратных связей, поступающими в блок мощности.

Тяговый электродвигатель ТЭД и колесо К – последние элементы силовой цепи. Параметры  $\omega_{эд}$ ,  $V$  и  $M_{сэд}, F_{с}$  соответствуют движущему силовому потоку и потоку сопротивления движению.

Подаваемый на усилитель с БМ сигнал пропорционален текущему значению мощности силовой цепи привода и после сравнения с задающим сигналом поступает в цепь возбуждения генератора.

Силовая цепь передачи мощности (движущий силовой поток) от двигателя до колеса автомобиля имеет вид

$$G_{г} \rightarrow M_{д} \cdot \omega_{д} \rightarrow U_{г} \cdot I_{г} \rightarrow M_{эд} \cdot \omega_{эд} \rightarrow F \cdot V.$$

Анализ протекающих в ТЭП БА процессов проведен с использованием ТХП.

1. Заданное значение  $F_{уз}$  постоянно.

Внешняя характеристика тягового генератора в рабочем диапазоне скоростей обеспечивает потребление от первичного двигателя постоянной мощности, и рабочая точка с координатами  $U_{г}I_{г}$  перемещается (в статике) по характеристике  $U_{г}(I_{г})$ , имеющей гиперболическую форму.

Согласно ТХП, указанное здесь перемещение рабочих точек по характеристикам  $U_{г}(I_{г})$ ,  $\omega_{эд}(M_{сэд})$ , и  $V(F_{с})$  является следствием одновременного протекания двух характерных процессов в замкнутом контуре: изменения нагрузки и изменения напряжения генератора. Если изменение  $M_{с}$  сопровождается перемещением рабочей точки по механической характеристике электродвигателя  $\omega(M_{с})$ , то изменение напряжения генератора приводит к образованию новой механической характеристики  $\omega_{эд}(M_{с})$  и перемещению рабочей точки в вертикальном направлении. Полученная характеристика, так же, как и другие характеристики, имеет гиперболическую форму и является результатом синтеза двух указанных процессов.

Процесс изменения напряжения генератора - внутреннее свойство замкнутого контура и не определяется водителем (так же, например, как процесс формирования механической характеристики электродвигателя последовательного возбуждения, протекающий при одновременном изменении магнитного потока).

Данный процесс не может протекать при условии  $F_C = \text{const}$  ( $M_C = \text{const}$ ), так как отклонение силы  $F_C$  является причиной изменения напряжения генератора.

2. Водитель управляет скоростью движения автомобиля путем принудительного воздействия на задающий сигнал усилителя ( $F_{y3} = \text{var}$ )

При протекании данного процесса рабочая точка переходит с одной характеристики гиперболической формы на другую. Изменение сигнала  $F_{y3}$  является внешним регулирующим воздействием.

3. Практически работа системы происходит при одновременном протекании двух рассмотренных процессов, определяющих скорость движения автомобиля. Водитель, действуя на соответствующую педаль, задает характеристику элементов привода, перемещение рабочей точки по которой определяется силой (моментом) сопротивления движению.

Протекание данного процесса иллюстрировано графически на рис. 2.5, где в координатах  $M_{с.эд}, \omega_{эд}$ , представлены механические характеристики ТЭД в разомкнутой (1,2,3) и замкнутой (4,5,6) системе ТЭП, а также соответствующие этим состояниям системы перемещения рабочей точки из положения «а» в положение «в» при увеличении момента сопротивления  $M_C$  и уменьшении  $U_r$ .

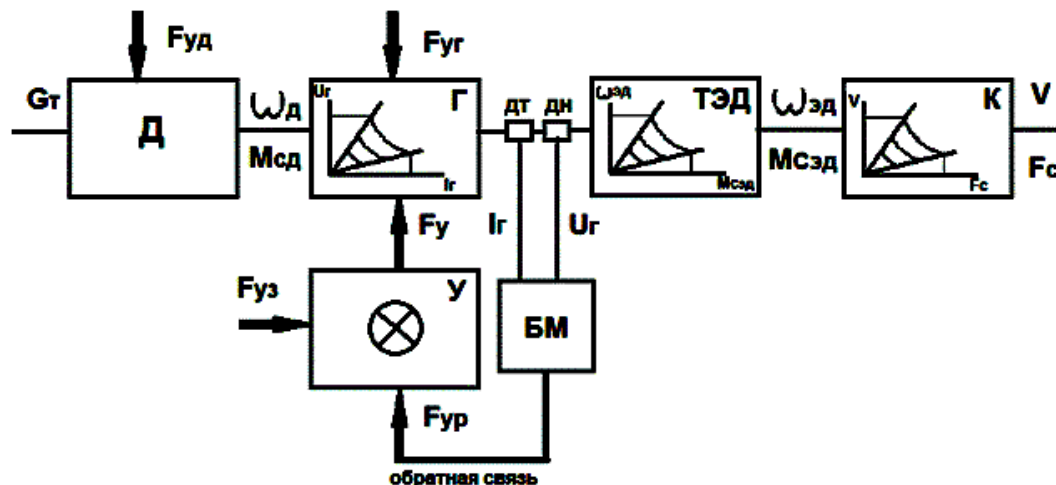


Рис. 2.4. Функциональная схема ТЭП БА

Одним из примеров применения тягового теплоэлектрического привода БА является ТЭП карьерных самосвалов БелАЗ, выпустившего ряд модификаций автомобилей и автопоездов повышенной и большой грузоподъемности с различным типом системы тягового электропривода.

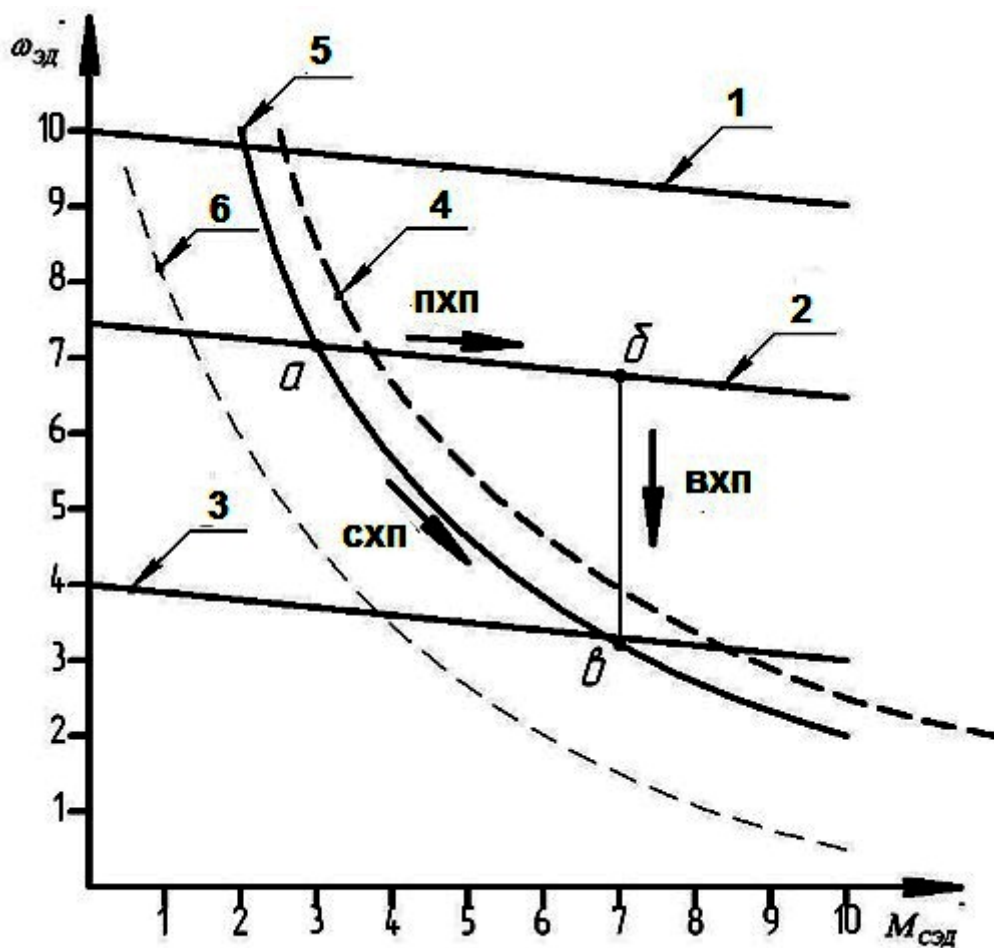


Рис. 2.5. Механические характеристики ТЭД

Непрерывно работая над совершенствованием систем тягового привода выпускаемых машин, БелАЗ создал тяговый привод карьерного самосвала с новым принципом построения системы автоматического управления, в состав которой введен программируемый контроллер, обеспечивающий непрерывный контроль преобразования формы мощностного потока в силовой цепи привода.

Если рассмотренное выше функционирование ТЭП БА строилось по принципу «жесткой» логики и подчинялось алгоритму аналоговой или цифроаналоговой техники, то в системе управления с программируемым контроллером значительно облегчается корректировка работы САУ по формированию тяговых (или тормозных) характеристик и их ограничений.

Обеспечение качественного принципа контролирования процессов управления позволило по-новому подойти к построению силовой части привода, в состав которой входят дизель, генератор,

выпрямители и тяговые двигатели. Генератор имеет две статорные обмотки, каждая из которых подключена к своему выпрямителю. Выходы выпрямителей последовательно соединены с якорными обмотками и обмотками возбуждения тяговых двигателей.

В рассматриваемом ТЭП отсутствует вращающийся возбудитель, а его функции осуществляет статическая силовая цепь, выполненная по схеме «электрического дифференциала», в которой при последовательном соединении ТЭД обеспечено принудительное равенство их токов и моментов.

Наиболее полное использование свободной мощности теплового двигателя в скоростном диапазоне обеспечивается плавным бесконтактным регулированием магнитного потока ТЭД.

БелАЗ продолжает работу над новой системой тягового привода (СУТЭП-3), обеспечивающей большую надежность работы ТЭП БА и не уступающей лучшим зарубежным аналогам.

Из зарубежных разработок ТЭП БА следует отметить разработки привода для гаммы карьерных самосвалов, выполненные американской компанией General Electric.

### 3. СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА АВТОМОБИЛЯ С КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ

#### 3.1. Общие принципы функционирования ТЭА с КЭУ

Силовая передача автомобиля с КЭУ имеет обычно не более двух источников энергии. Первый источник однонаправленный. Второй источник двунаправленный с целью возврата части энергии торможения, которая в обычных ТС с ДВС рассеивается в тепловой форме. Общая структурная схема и схема силовых потоков представлены на рис.3.1.

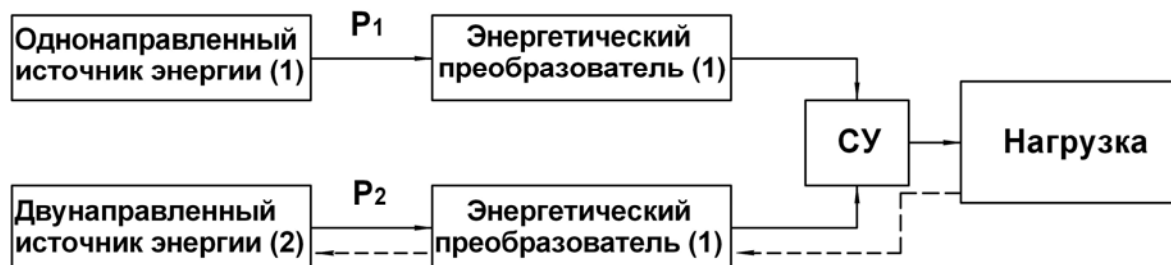


Рис.3.1. Общая структурная схема ТЭА с КЭУ.

Источники поставляют мощность потребителям ТЭА при различных способах объединения силовых потоков, основные из которых следующие.



1. Источник 1 один поставляет мощность потребителю и обеспечивает передвижение ТС. Батарея полностью разряжена или заряжена. Мощность ДВС достаточна для передвижения.

2. Источник 2 один поставляет мощность нагрузке. Способ является электрическим способом продвижения, в котором ДВС отключен. Этот режим может использоваться в случаях, когда двигатель не может работать эффективно, такие, например, как: очень низкая скорость или в местах, где выбросы вредных веществ строго запрещены.

3. Оба источника и 1 и 2 подают мощность нагрузке в одно и то же время. Способ является гибридным способом тяги и может использоваться, когда необходимо большое количество мощности, например, во время резкого ускорения или крутого подъема.

4. Способ является регенеративным видом торможения, при котором кинетическая энергия транспортного средства восстанавливается через электрическую машину, функционирующую как генератор. Восстановленная энергия хранится в батарее и может быть использована снова.

5. Источник 2 получает мощность от источника 1. Способ является режимом, в котором двигатель заряжает батарею, в то время как транспортное средство безостановочно движется по инерции или спускается по небольшому уклону.

6. Режим, при котором регенеративное торможение и ДВС заряжают батарею одновременно.

7. Источник 1 поставляет мощность нагрузке и источнику 2 в одно и то же время. Способ является режимом, при котором двигатель приводит в движение транспортное средство и заряжает батарею одновременно.

8. Источник 1 поставляет мощность источнику 2, а источник 2 – нагрузке. Способ является режимом, при котором двигатель заряжает батарею, а батарея поставляет мощность нагрузке.

9. Способ является режимом, в котором силовые потоки поступают в батарею от теплового двигателя, обеспечивающего движение транспортного средства. Типичная конфигурация этого способа – два привода, отдельно установленные на передней и задней осях транспортного средства.

Комбинация отмеченных способов объединения силовых потоков для каждого эксплуатационного режима ТС позволяет обеспечить большую гибкость управления транспортным средством и при надлежащем контроле оптимизировать его работу.

Мощностной поток сопротивления движению автомобиля может быть представлен в виде двух основных составляющих – средней (устойчивой) мощности, имеющей постоянное значение, и

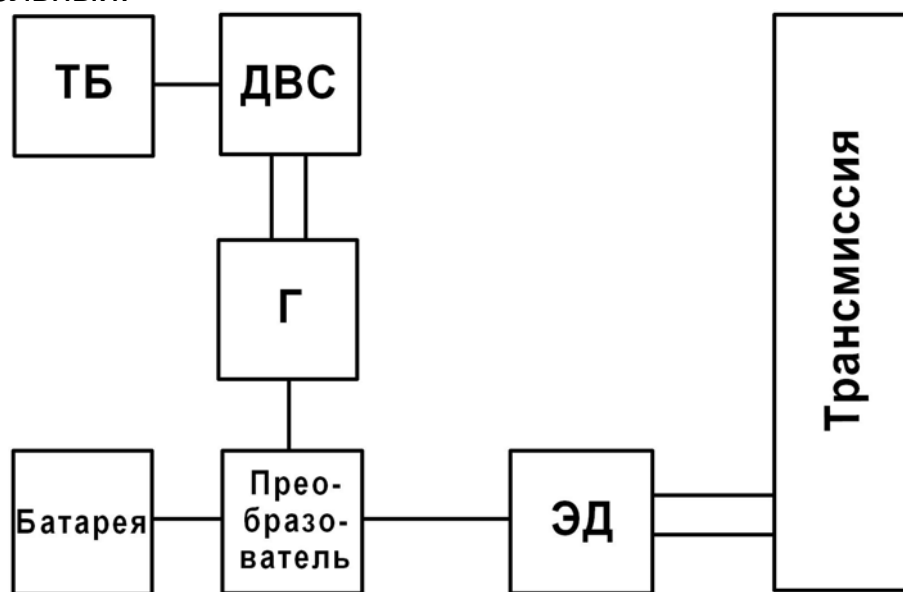
динамической мощности. Для противодействия этим составляющим потокам в гибридном приводе автомобиля используются соответственно: тепловой двигатель или топливный элемент и электрический двигатель (получающий питание от батарей или ультраконденсаторов) или маховичный двигатель. Работа каждого двигателя может быть оптимизирована в своей области, что обеспечивает эффективность использования ТЭА в целом.

### 3.2. Классификация ТЭА с КЭУ

Дальнейшее рассмотрение устройства и функционирование систем ТЭА с КЭУ производится на основе представленной ниже классификации.

Классификация ТЭА с КЭУ проведена по принципу выполнения связей между отдельными компонентами привода, определяющими маршруты силовых потоков энергии с учетом их функционального назначения и способов объединения.

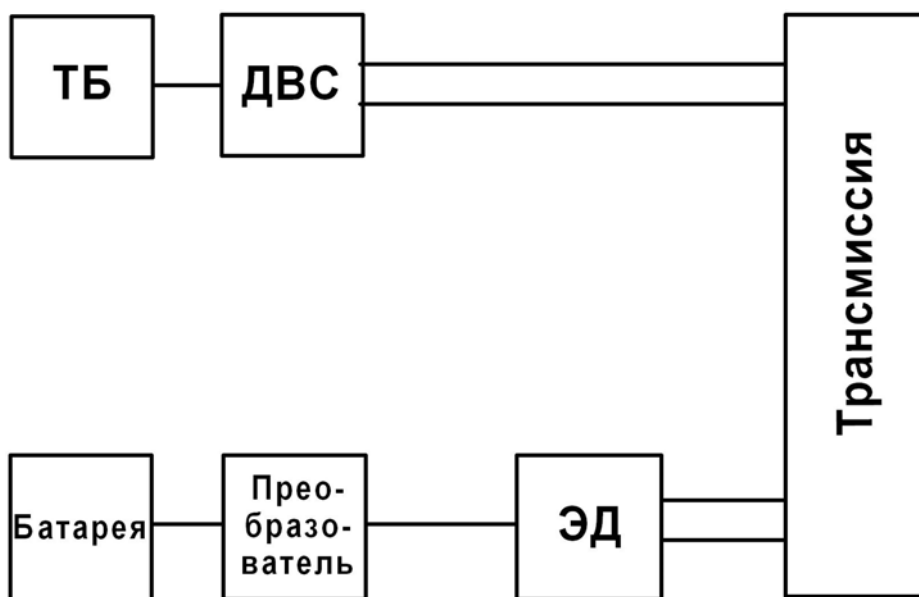
Традиционно ТЭА с КЭУ были классифицированы на два основных (базовых) типа структурных схем – последовательный и параллельный.



а

Общим принципом классификации ТЭА на последовательную и параллельную схему является способ передачи силового потока от ДВС до колеса автомобиля.

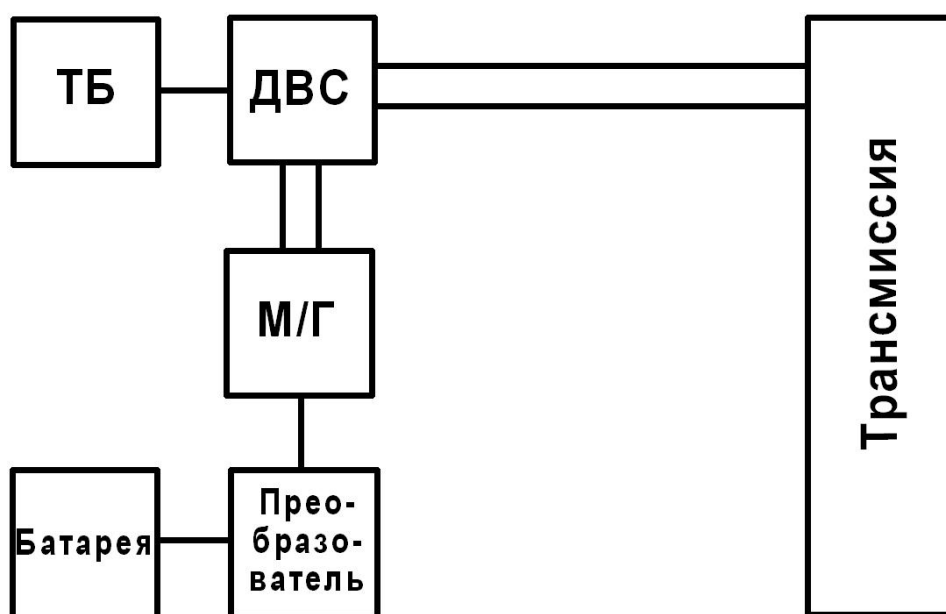
По мере развития и совершенствования структуры ТЭА с КЭУ и появления дополнительных возможностей оптимизации в классификационную схему введены такие модификации привода, как легкий гибрид и комплексный гибрид.



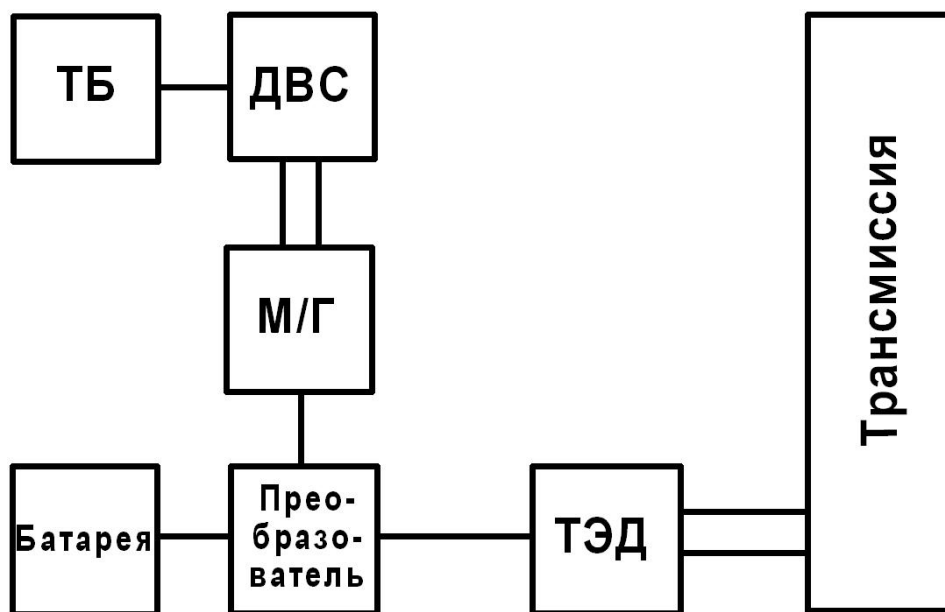
б

В приведенных структурных схемах ДВС и ЭД даны как примеры статического и динамического источников энергии.

На основе различных комбинаций представленных выше основных типов ТЭА с КЭУ возможна разработка так называемых



в



г

Рис.3.2. Схема ТЭА с КЭУ: а – последовательная; б – параллельная; в – легкая гибридная; г – комплексная гибридная

смешанных схем, в том числе схем с подводом мощности к различным ведущим осям автомобиля.

Примеры выполнения структурных и функциональных схем отдельных классификационных групп ТЭА представлены ниже.

### 3.3 Последовательная схема ТЭА с КЭУ

#### 3.3.1 Структурная схема ТЭА

Основной принцип выполнения последовательной схемы ТЭА – отсутствие механической связи теплового двигателя с ведущими колесами автомобиля.

В тяговом электроприводе автомобиля с КЭУ, выполненном по последовательной схеме, механическая энергия, получаемая от ДВС, преобразуется в электрическую, а потом снова в механическую. Цепь привода содержит два источника энергии – тепловой и электрический. Тепловой двигатель приводит во вращение электрический генератор и обеспечивает отдельное или совместное со вторым электрическим источником питание тягового электродвигателя. Система Д-Г является однонаправленным источником энергии. Тяговый электродвигатель в тормозном режиме выполняет роль генератора и обеспечивает возврат энергии второму источнику.

Электрический генератор Г присоединен к тяговому электродвигателю через два электронных преобразователя  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ . Второй

источник энергии – двунаправленный и связан с осевой цепью привода с помощью преобразователя  $\Pi_3$ .

Структурная схема ТЭА, выполненная по последовательной схеме, представлена на рис 3.2.

Основные преимущества систем электропривода автомобилей, выполненных по последовательной схеме:

- 1) двигатель механически изолирован от ведомых колес и управляем в любой точке своих характеристик, в том числе в пределах области максимальной эффективности;
- 2) возможность использования быстродействующего двигателя;
- 3) упрощение кинематической схемы трансмиссии;
- 4) простота стратегии и реализации законов управления.

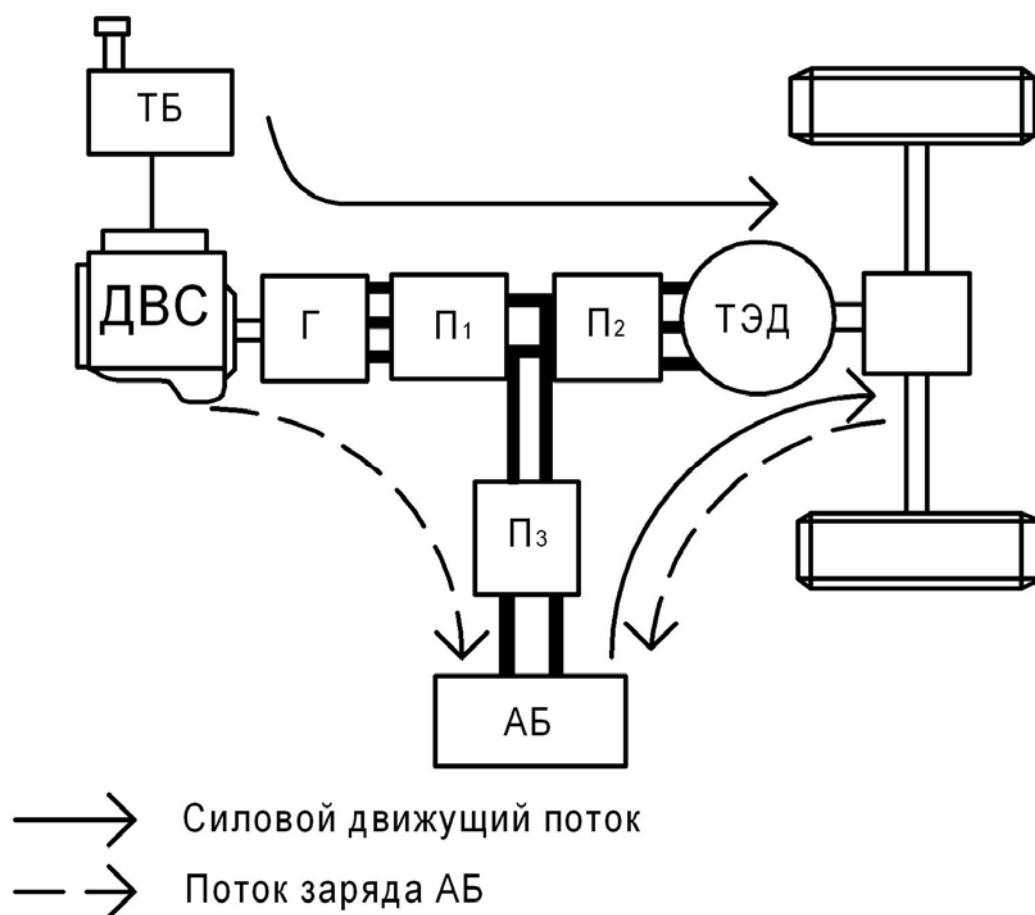


Рис. 3.3. Структурная схема ТЭА с КЭУ (последовательная схема)

К недостаткам последовательной схемы следует отнести двойное преобразование энергии в осевой цепи привода и обусловленные этим повышенные потери в трансмиссии, а также значительные массогабаритные показатели электрооборудования.

Концепция последовательной схемы ТЭА с КЭУ была разработана на основе концепции ТЭП электромобиля с целью

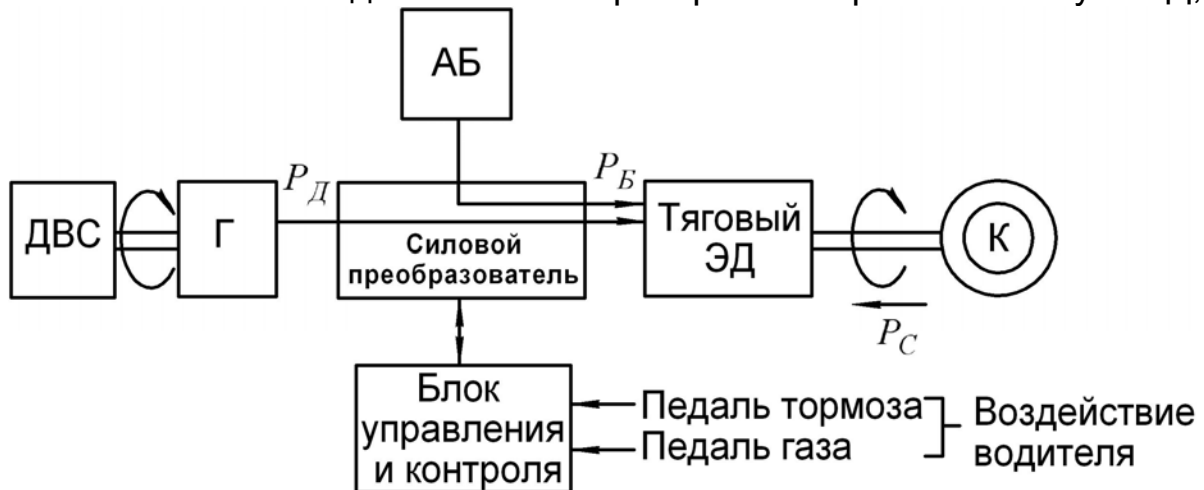
устранения присущих ему недостатков (см. гл. 2) за счет введения в состав трансмиссии генератора для зарядки аккумуляторных батарей. Дальнейшее развитие привода привело к образованию схемы ТЭП в форме комбинированного привода, представленного на рис 3.3, на базе которой выполнены более совершенные современные структуры ТЭА (по последовательной схеме и её модификациям в форме легкого и комплексного гибридов).

### 3.3.2 Режимы работы автомобиля с последовательной схемой ТЭП с КЭУ

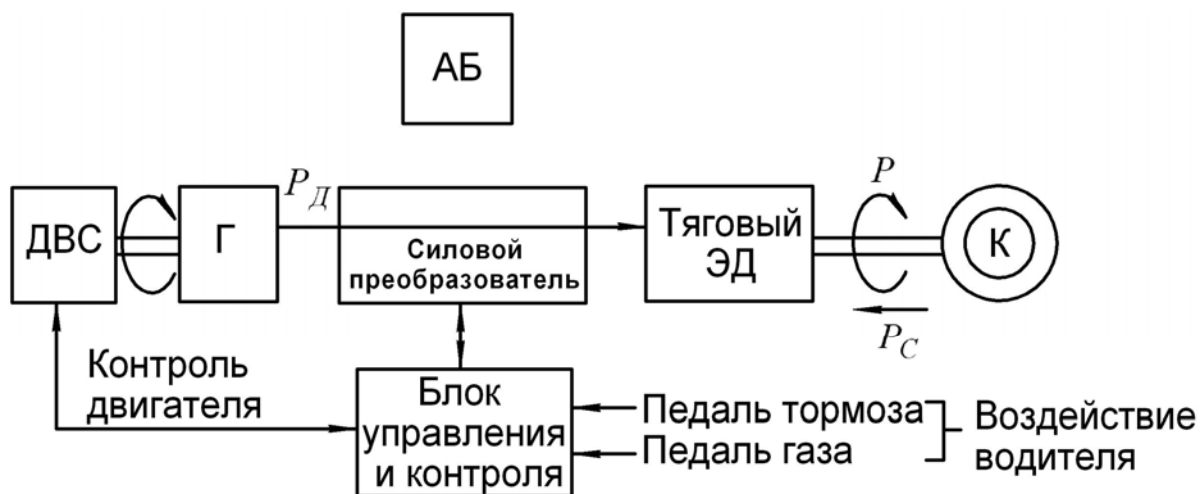
В ТЭА с КЭУ, выполненной по последовательной схеме, возможны следующие режимы работы (рис. 3.4):

1. Гибридный способ – энергия от двигатель/генератора поступает в тяговый двигатель (рис. 3.4,а).

2. Машинный способ – сила тяги транспортного средства обеспечивается двигатель/генератором через систему Г-Д;



а



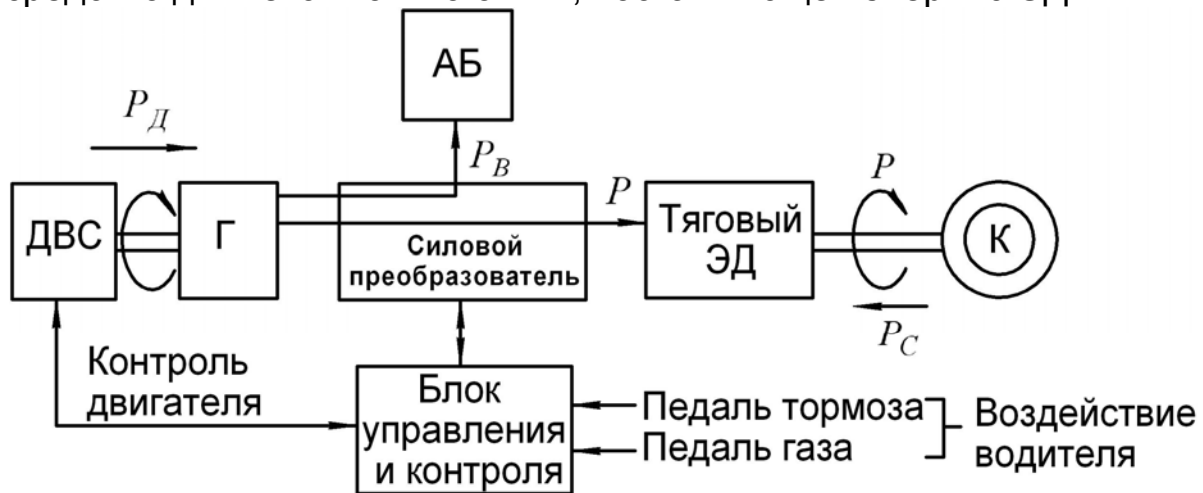
б

Батарея не поставляет энергию. Электрические машины передают энергию от двигателя до ведущих колес (рис. 3.4,б).

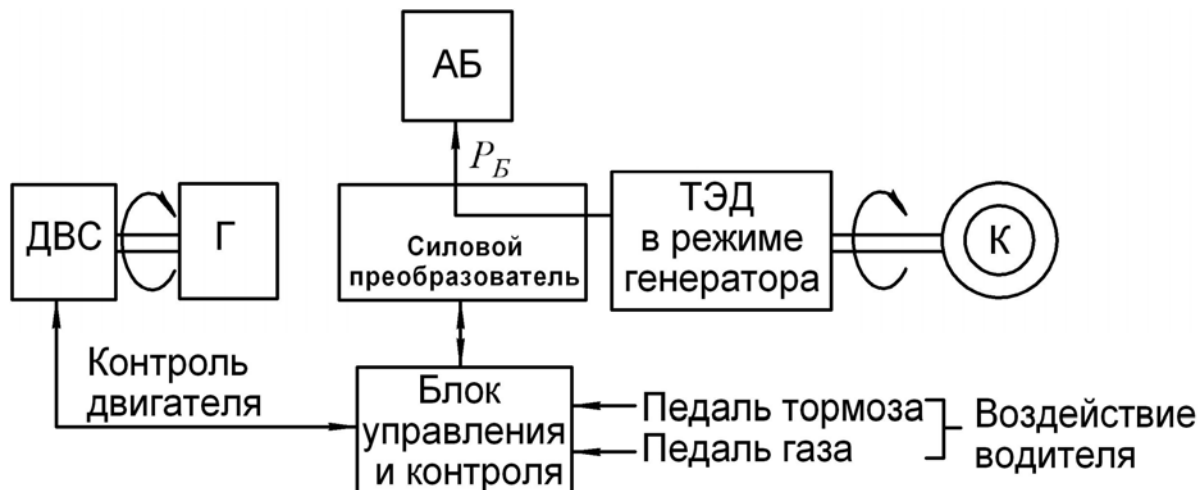
3. Способ машинной тяги и заряд батареи: двигатель/генератор поставляет энергию для заряда батареи и движения транспортного средства (рис. 3.4,в).

4. Генераторный способ торможения: двигатель/генератор выключен, тяговый двигатель работает генератором. Произведенная энергия используется для заряда батарей (рис. 3.4,г).

5. Электрический способ – двигатель выключен, и транспортное средство движется только от АБ, поставляющей энергию ЭД.



в



г

Рис.3.4. Режимы работы автомобиля с последовательной схемой ТЭП с КЭУ: а – разгон, подъем в гору; б – движение от ДВС; в – движение и заряд АБ; г – генераторное торможение

6. Способ заряда батареи – тяговый двигатель не получает энергии, а мотор/генератор заряжает батарею.

7. Способ гибридного заряда батареи – и двигатель-генератор, и тяговый двигатель, работающий как генератор, заряжают батарею.

Каждому режиму соответствуют силовые потоки, направления которых показаны стрелками на рис. 3.4.

### 3.3.3. Функциональная схема ТЭА с КЭУ

Функциональная схема ТЭА с КЭУ, выполненного по последовательной схеме, представлена на рис. 3.5.

Кроме компонентов силовой части ТЭП в состав схемы включены блок управления и контроля автомобиля (БУК), блоки управления тепловым и тяговым электродвигателями и контроля работы отдельных элементов схемы. Блок управления и контроля автомобиля является главным, центральным блоком системы, на который поступают команды оператора (водителя). Сигналы с БУК направлены к местным блокам управления тепловым двигателем и силовым преобразователем ТЭД, а сигналы контроля за работой ДВС, ТЭД и тормоза – в обратном направлении. На БУК поступают также сигналы об уровне заряда АБ и скорости автомобиля.

Ввиду отделения ДВС от ведущих колес в последовательной схеме ТЭА скорость и момент теплового двигателя не зависят от требований к скоростному и силовому факторам тягового электродвигателя и с помощью системы управления могут быть установлены таким образом, чтобы ДВС работал в оптимальном диапазоне с минимальными расходом топлива и объемом выброса отработавших газов.

В общем случае работа системы управления сводится к выбору необходимого эксплуатационного режима работы привода и управлению в нем силовыми потоками в соответствии с реализуемой стратегией и отмеченными ниже программами их проведения:

1. В гибридном режиме работы двигатель/генератор и источник максимальной мощности обеспечивают совместное питание тягового электродвигателя, а силовые движущие потоки двигателя и батареи складываются.

$$P = P_{д} + P_{б} = P_{с},$$

где  $P$ - мощность, запрашиваемая водителем.

Водитель полностью выжимает педаль газа. Система управления обеспечивает работу двигателя в оптимальном рабочем диапазоне с минимальным уровнем расхода топлива и выбросов.



2. В режиме движения от ДВС (в нормальных дорожных условиях) при отключенной батарее управление приводом сводится к управлению силовым движущим потоком установки Д/Г, уравниваемым потоком сопротивления движению при заданной величине мощности, запрашиваемой водителем

$$P = P_D = P_C.$$

3. В режиме движения от установки Д/Г при одновременном заряде АБ силовой поток делится на две части:

$$P_D = P + P_B \quad P = P_C.$$

Управление приводом соответствует п.2 с контролем уровня заряда АБ.

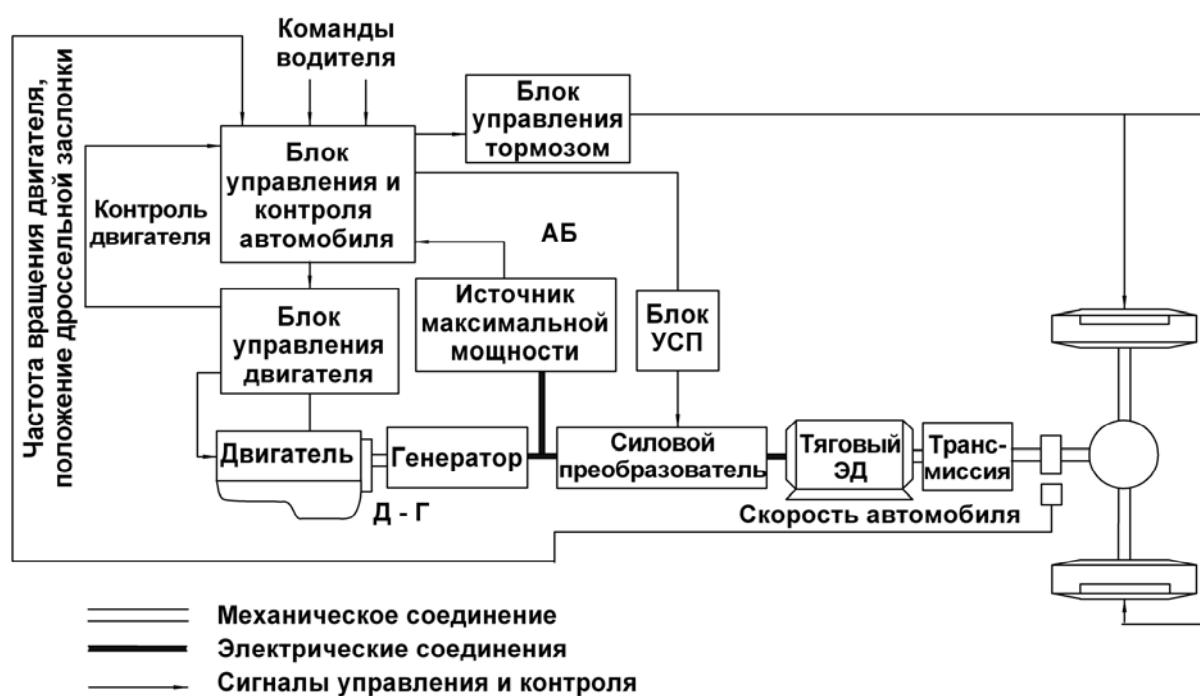


Рис.3.5. Функциональная схема ТЭА с КЭУ (последовательная схема)

4. В режиме генераторного способа торможения тяговый электродвигатель работает генератором, конвертируя часть кинетической энергии массы автомобиля в электрическую энергию для заряда АБ. Силовой поток меняет свою форму и направление и уравнивается электрическим потоком сопротивления заряду АБ. Управление приводом производится под контролем уровня заряда АБ.

### **3.3.4 Стратегия управления работой автомобиля с ТЭП, выполненным по последовательной схеме.**

Стратегия управления это правило контроля и управления, заданное в контроллере транспортного средства и командующее действием каждого компонента ТЭА. Контроллер транспортного средства получает команды от водителя и в соответствии с сигналом обратных связей от всех компонентов принимает решение на применение надлежащих способов операций.

Применяется много вариантов стратегий управления тяговым приводом автомобиля. В предлагаемом ниже разделе рассмотрены две основные стратегии управления, используемые в ТЭА, выполненном по последовательной схеме – стратегия поддержания максимального уровня заряда источника пиковой мощности (Max. SOC-of-PPS) и стратегия включения и отключения ДВС – Thermostat Control Strategy (Engine – On – Off).

#### **1. Стратегия поддержания максимального уровня заряда источника пиковой мощности**

Цель стратегии – обеспечение задаваемой по требованию водителя величины нагрузочной мощности при одновременном поддержании максимального уровня заряда аккумулирующего источника (аккумуляторной батареи – на рис. 3.4).

Наибольшая эффективность данной стратегии достигается для автомобилей, работа которых ориентирована на частые трогания и остановки, а также для специальных транспортных средств с ответственными режимами пусковых операций, реализуемых от источника пиковой мощности.

Содержание стратегии представлено с помощью графика на рис. 3.6 и схемы алгоритма управления на рис. 3.7.

На рис. 3.6 точки А, Б, В, Г соответствуют задаваемым водителем значениям нагрузочной мощности в режимах тяги и торможения.

Точка А представляет требуемую нагрузочную мощность в тяговом режиме, большую, мощности, которую может реализовать двигатель/генератор. В этом случае АБ должна восполнять недостающую часть мощности двигатель/генератора.

Точка Б представляет мощность, меньшую мощности, которую двигатель/генератор может обеспечить, работая в оптимальной области ДВС (рис. 3.8). В этом случае два операционных режима могут использоваться в зависимости от уровня заряда АБ. В первом случае, если заряд АБ ниже верхнего максимального уровня, имеет

место режим заряда АБ, а двигатель/генератор управляется в пределах оптимальной операционной области. При этом часть его мощности поступает в тяговый двигатель на движение автомобиля, а другая часть на заряд АБ. Во втором случае, если заряд АБ достиг максимального уровня, двигатель/генератором управляют так, чтобы произвести мощность, равную требуемой нагрузочной мощности, а заряд АБ не используется.

Точка В представляет мощность, расходуемую на торможение, которая больше, чем мощность, обеспечиваемая генератором (максимальная регенеративная мощность). В этом случае применяется гибридный способ торможения, при котором генератор реализует максимальную тормозную мощность, а механическая тормозная система дополняет остальную часть.

Точка Г соответствует случаю, когда мощность, расходуемая на торможение, меньше мощности, которую может произвести ЭМ в генераторном режиме, в этом случае используется только регенеративное торможение.

## 2. Стратегия включения и отключения ДВС (Thermostat Control Strategy – Engine – On – Off).

Представленная выше стратегия управления позволяет поддерживать заряд источника пиковой мощности на высоком уровне. Однако в небольшом количестве режимов, таких, например, как долгое движение с легкой загрузкой на шоссе с постоянной скоростью, операция заряда достаточно просто и быстро выполняема, а двигатель/генератор вынужден работать с выходной мощностью, меньшей её оптимального значения, и эффективность привода уменьшается. В этом случае контроль за термостатом двигателя и его отключение и включение были бы рациональны.

Стратегия такого управления показана на рис. 3.9. Режим двигателя/генератора полностью управляется уровнем заряда источника. Когда уровень заряда достигает заданной линии, двигатель/генератор выключен, и транспортное средство продвигается только от АБ. Когда уровень достигает нижней линии, двигатель/генератор включен.



Рис. 3.6. Стратегия мобилизации максимального уровня заряда источника пиковой мощности:

А- гибридный тяговый режим; Б- уровень частичной нагрузки Д/Г; В- гибридный тормозной режим; Г- регенеративный тормозной Режим



Рис. 3.7. Схема алгоритма управления стратегии стабилизации максимального уровня пиковой мощности.

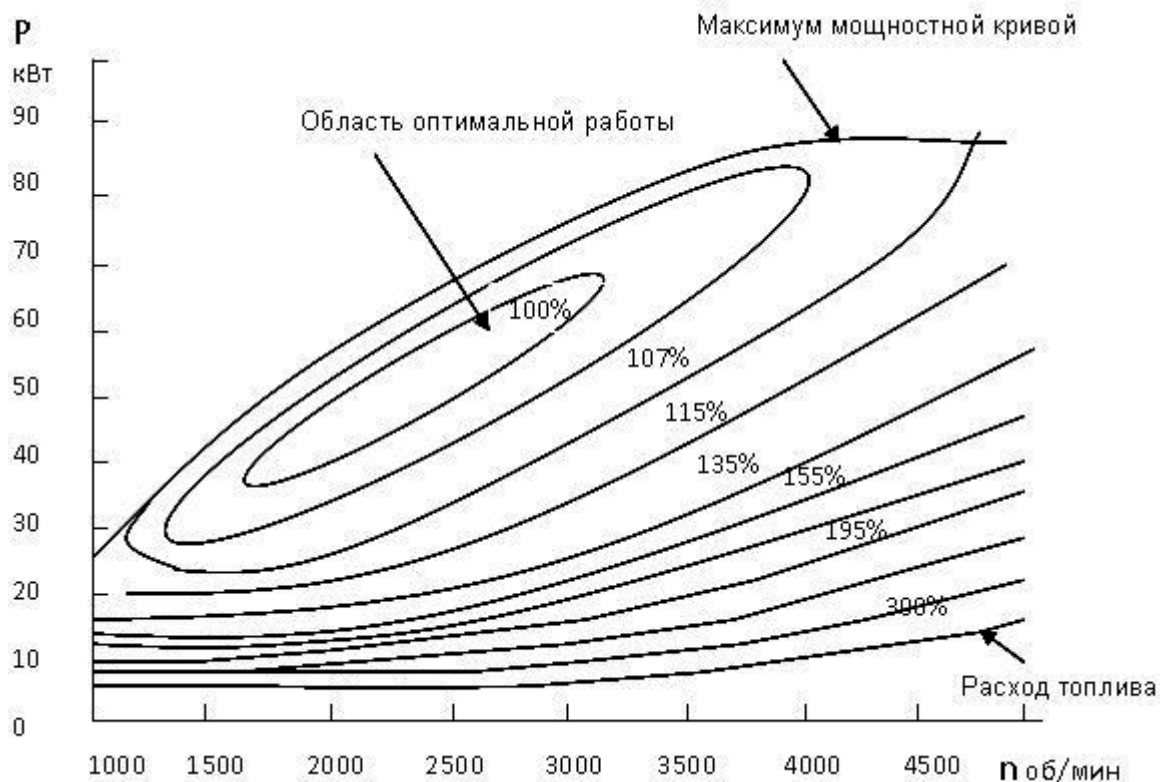


Рис. 3.8. Характеристики ДВС и область оптимальной работы

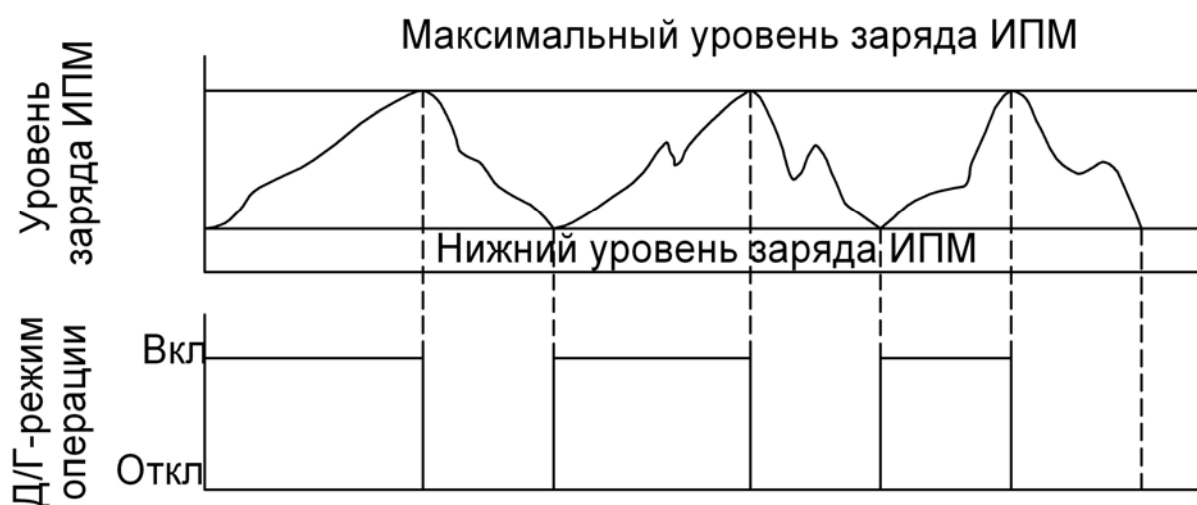


Рис. 3.9. Стратегия управления включением и отключением ДВС

### 3.4. Параллельная схема ТЭА с КЭУ

#### 3.4.1 Структурная схема ТЭА

Принципиальной особенностью построения параллельной схемы ТЭА с КЭУ является наличие двух самостоятельных цепей, по одной из которых ДВС передает свое усилие механическим путем колесам автомобиля, как в обычном транспортном средстве. Вторая параллельная цепь выполнена на основе электрического

привода, и электродвигатель может помогать ДВС через соединение с первой цепью.

В отличие от последовательной схемы ТЭА с КЭУ параллельная схема позволяет одновременно приводить в движение автомобиль при использовании энергии двух источников. Основные преимущества параллельной схемы – нет необходимости в генераторе, меньшая мощность электродвигателя и отсутствие многократного преобразования мощности от ДВС к ведущим колесам. Это повышает эффективность привода в целом. Однако из-за механического соединения ДВС с колесами общее управление приводом становится сложнее, чем при последовательной схеме.

Структурная схема ТЭА с КЭУ представлена на рис 3.10.

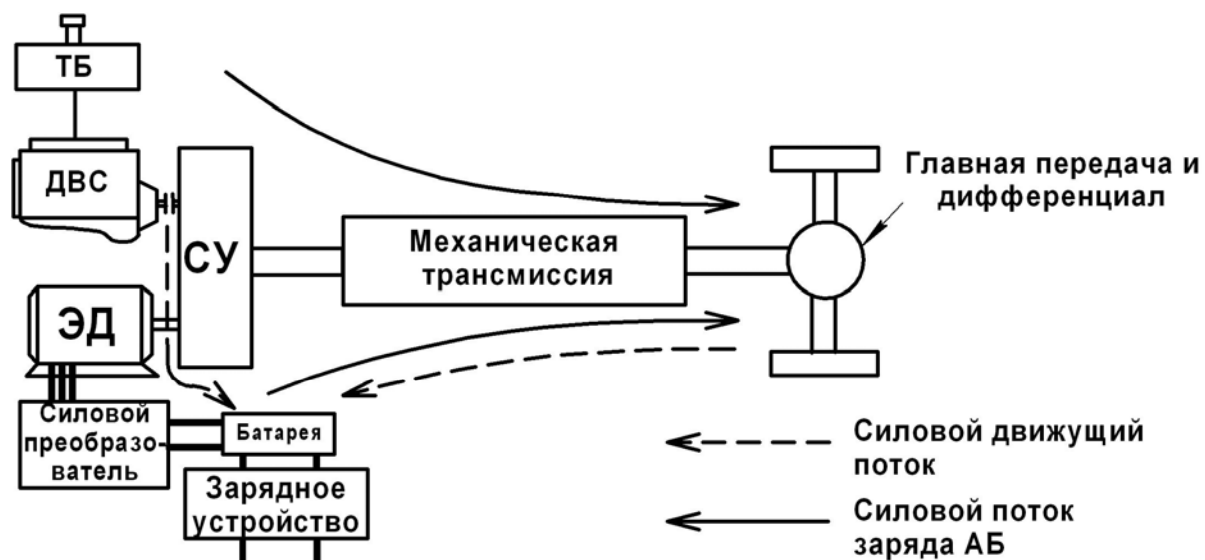


Рис. 3.10. Структурная схема ТЭА с КЭУ (параллельная схема ТЭП)

### 3.4.2 Варианты выполнения параллельных схем ТЭА с КЭУ

Возможно несколько конфигураций выполнения параллельной схемы ТЭА с КЭУ. При этом методика выполнения одной из них может быть неприемлемой для другой. В каждом конкретном случае схема тягового привода автомобиля должна соответствовать его назначению и условиям эксплуатации.

#### 3.4.2.1 Силовое СУ

Объединение создаваемых силовых потоков ДВС и ЭД (и ряд других функций) производится в специальном дополнительном устройстве, называемом соединительным устройством (СУ) и занимающем различное положение в общей схеме ТЭП в зависимости от конструктивных особенностей и назначения

транспортного средства. Принятое конструктивное решение СУ определяется выполнением тягового привода автомобиля.

Соединительные устройства ТЭА имеют несколько различных модификаций и могут быть классифицированы по факторам (параметрам) силовых потоков на три основные группы, в каждой из которых разделяются по виду исполнения на механические и электромагнитные, двухвальные и одновальные. Основные группы классификационной схемы СУ применительно к механическому силовому потоку вращательного движения - силовые (моментные), скоростные и смешанные (комбинированные) соединительные устройства.

В силовом СУ складываются вращающие моменты ДВС и ЭД или вращающий момент делится на две части - на движение автомобиля и заряд аккумуляторной батареи.

На рис 3.11 представлена обобщенная схема СУ с двумя входами от ДВС и ЭД. Передаточная функция устройства соответствует уравнениям

$$M_{\text{вых}} = k_1 M_{\text{вх1}} + k_2 M_{\text{вх2}};$$

$$\omega_{\text{вых}} = \frac{\omega_{\text{вх1}}}{k_1} = \frac{\omega_{\text{вх3}}}{k_2},$$

где  $k_1$  и  $k_2$  - передаточные коэффициенты.

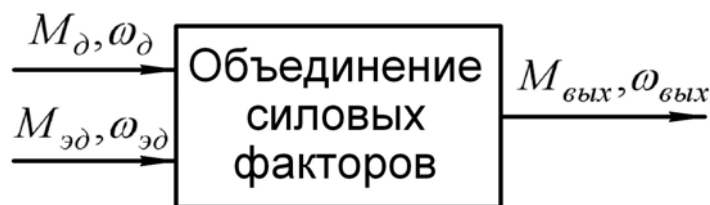


Рис. 3.11. Силовое СУ

На рис 3.12 представлены схемы конструктивного исполнения силовых СУ с двумя валами. В каждом варианте трансмиссия может занимать разные положения и включать в свой состав механизмы с различными характеристиками. Оптимальная конструкция ПУ зависит также от размеров моторного отделения и габаритных параметров машин. Варианты механических силовых СУ представлены на рис.3.12.

На рис.3.13 представлена обобщенная схема привода с двухвальным СУ. В одном варианте используются две трансмиссии: первая  $Tr1$  – между ДВС и СУ, вторая  $Tr2$  – между ЭД и СУ. Обе передачи могут быть простыми или многоступенчатыми. Трансмиссия  $Tr3$  отсутствует.

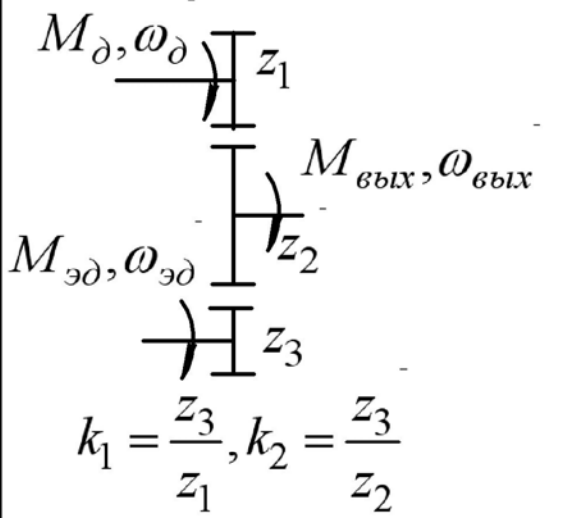
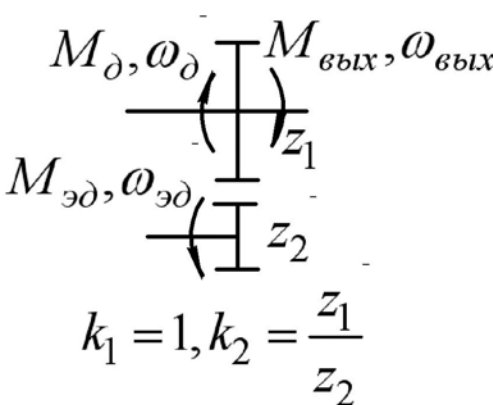
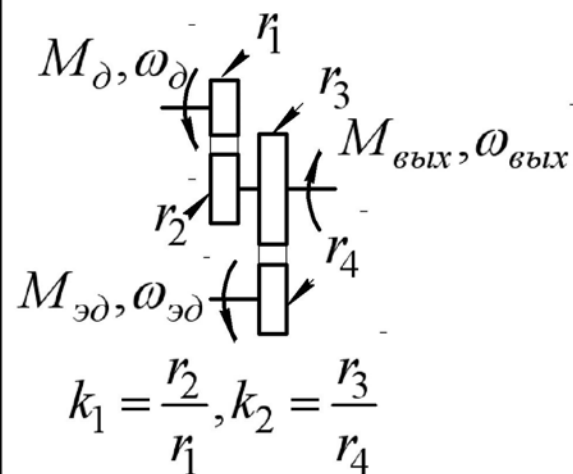
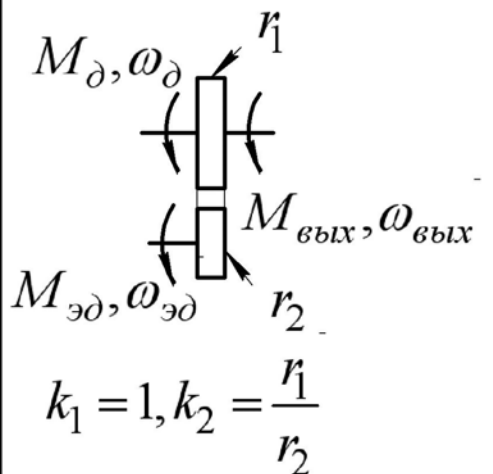
| <b>Зубчатая передача</b>   |   |
|--|---|
|  <p style="text-align: center;"><math>k_1 = \frac{z_3}{z_1}, k_2 = \frac{z_3}{z_2}</math></p> <p><math>z_1, z_2, z_3</math> - число зубьев</p>          |  <p style="text-align: center;"><math>k_1 = 1, k_2 = \frac{z_1}{z_2}</math></p> <p><math>z_1, z_2</math> - число зубьев</p>     |
| <b>Ременная передача</b>   |   |
|  <p style="text-align: center;"><math>k_1 = \frac{r_2}{r_1}, k_2 = \frac{r_3}{r_4}</math></p> <p><math>r_1, r_2, r_3, r_4</math> - радиусы шкивов</p> |  <p style="text-align: center;"><math>k_1 = 1, k_2 = \frac{r_1}{r_2}</math></p> <p><math>r_1, r_2</math> - радиусы шкивов</p> |

Рис. 3.12. Механические силовые СУ

Во втором варианте общая трансмиссия Тр3 расположена после СУ и имеет суммарный момент на входе. Трансмиссии Тр1 и Тр2 отсутствуют.



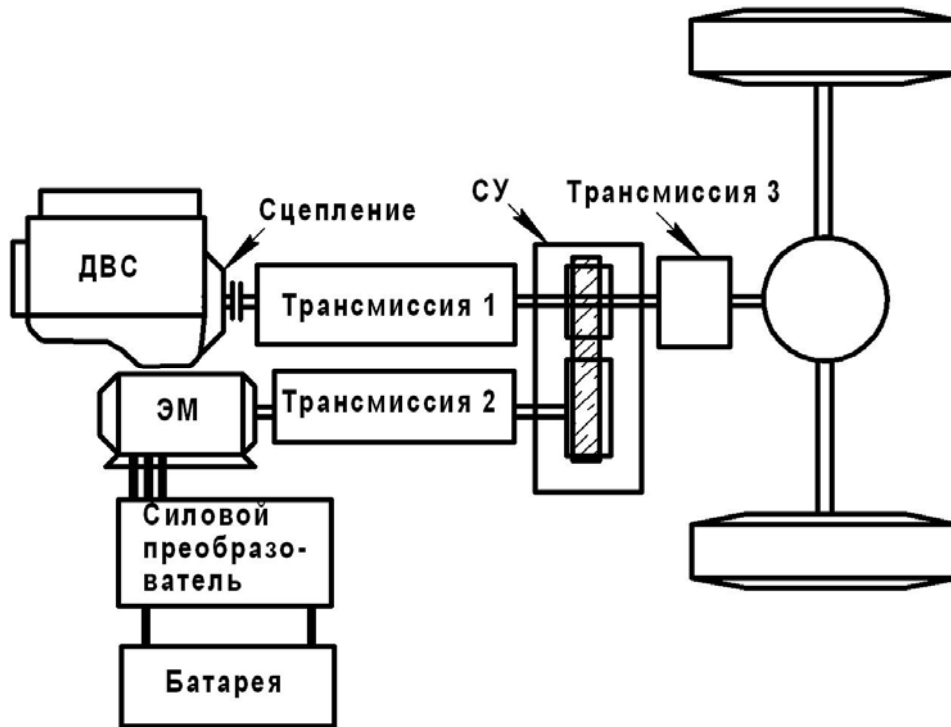


Рис.3.13. ТЭП с механическим силовым СУ

Вторая ветвь классификационной схемы силового СУ представлена с конфигурацией единственного вала, где ротор электрической машины функционирует как соединительное устройство моментов ЭД и ДВС. Трансмиссия может быть размещена до и после СУ. На рис.3.14, 3.15 приведены структурная схема СУ и схема одновального привода.

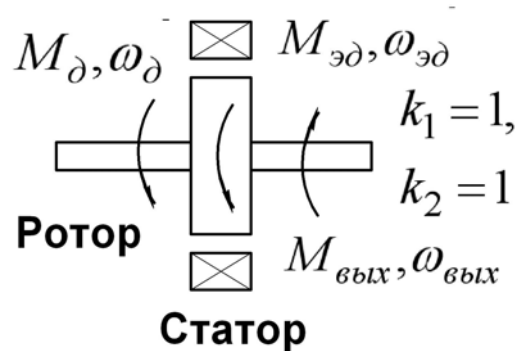


Рис 3.14. Электромагнитное СУ

Другой вариант выполнения ПУ с силовым соединительным устройством – индивидуальная схема привода осей автомобиля, в которой одна ось приводится в движение от ДВС, а другая от электродвигателя. Сложение тяговых моментов осей производится через дорожное покрытие. Обе трансмиссии могут быть

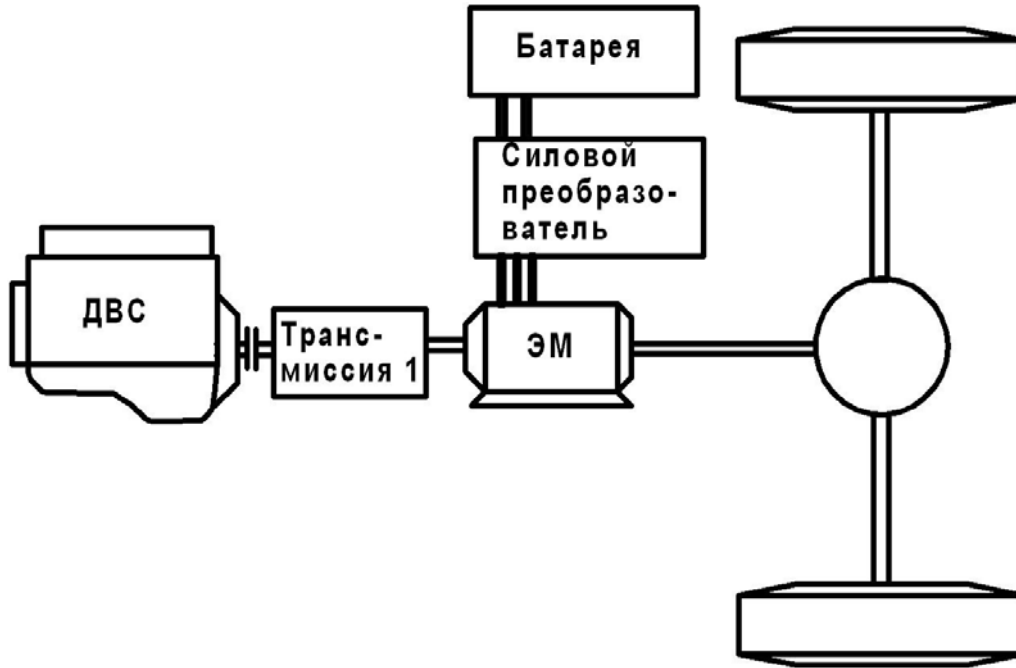


Рис.3.15, ТЭП с электромагнитным силовым СУ

одно- и многоступенчатыми. Использование индивидуального привода осей позволяет оптимизировать тягу на скользких дорогах, распределяя тяговые усилия между ведущими колесами.

### 3.4.2.2. Скоростное СУ

Вторую группу классификационной схемы составляют СУ, обеспечивающие сложение скоростных факторов силовых потоков ДВС и ЭД.

Обобщенная структурная схема скоростного СУ представлена на рис.3.16, а передаточные функции соответствуют уравнениям

$$\omega_{\text{вых}} = k_1 \omega_{\text{вх1}} + k_2 \omega_{\text{вх2}};$$

$$M_{\text{вых}} = \frac{M_{\text{вх1}}}{k_1} = \frac{M_{\text{вх2}}}{k_2};$$

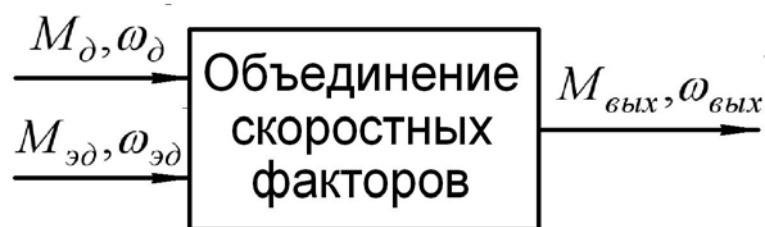


Рис 3.16. Скоростное СУ

Варианты практического выполнения передаточных устройств ТЭП представлены на рис. 3.17.

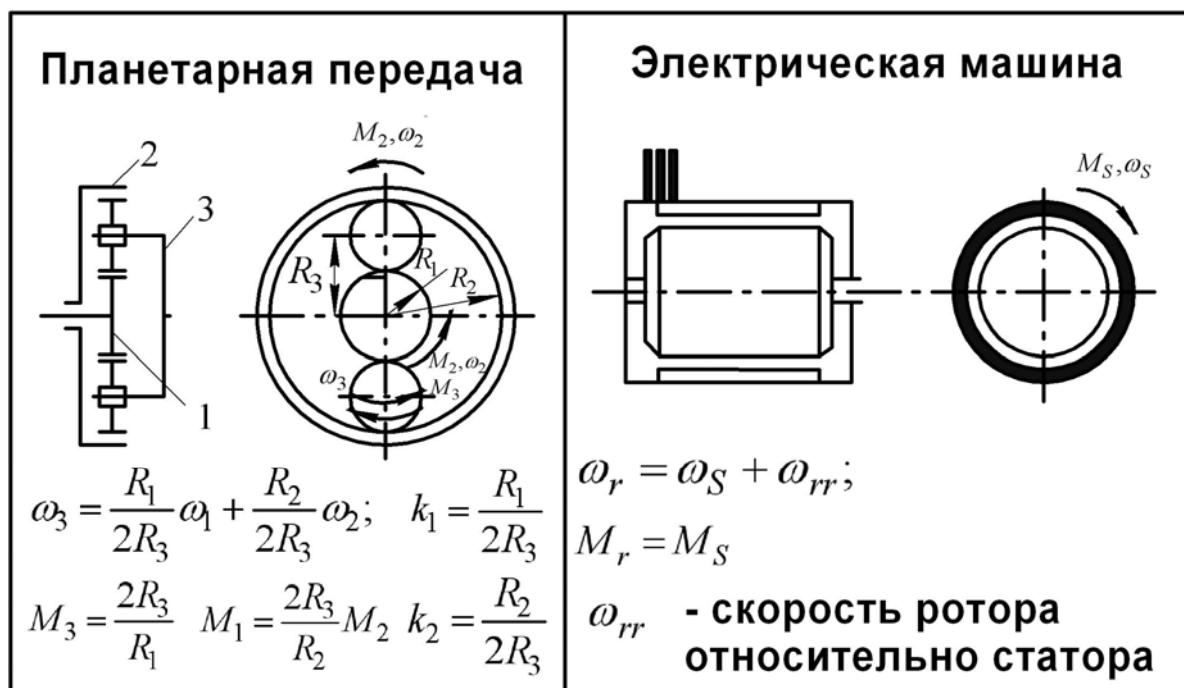


Рис.3.17. Механические и электромагнитные СУ

На рис. 3.18, СУ выполнена с использованием планетарной передачи, где ДВС передает свою мощность механизму солнца через сцепление и трансмиссию, а электродвигатель – кольцевому механизму через ряд промежуточных устройств. Для фиксации механизма солнца и кольца используются специальные замки 1 и 2, с помощью которых реализуются различные режимы работы автомобиля.

- Гибридная тяга. Замки 1 и 2 отпущены. Механизм солнца и кольцевой механизм могут вращаться, а ДВС и электрическая машина создают положительную скорость и вращающий момент на ведущих колесах.
- Тяга от ДВС. Замок 2 заблокирован, замок 1 отпущен. Тяга от ДВС передается к ведущим колесам.
- Тяга от электродвигателя. Замок 1 заблокирован (ДВС отключен или сцепление выжато), и замок 2 отпущен. ЭД передает момент ведущим колесам.
- Генеративное торможение. Замок 1 заблокирован, ДВС отключен или муфта расцеплена. Электрическая машина работает в тормозном режиме. Заряд батареи от ДВС. Оператор устанавливает отрицательную скорость электрической машины. ЭМ принимает энергию от ДВС.

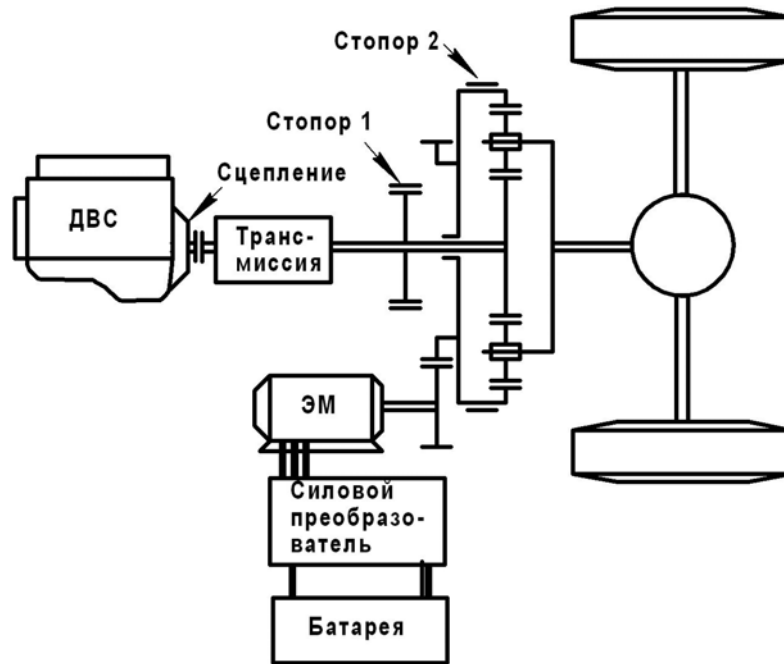


Рис 3.18. ТЭП с механическим скоростным СУ

На рис.3.19 соединительное устройство выполнено на базе электрической машины. Замки 1 и 2 используются для блокировки статора и статора к ротору. Структура ПУ может обеспечить выполнение всех отмеченных режимов работы ТЭА.

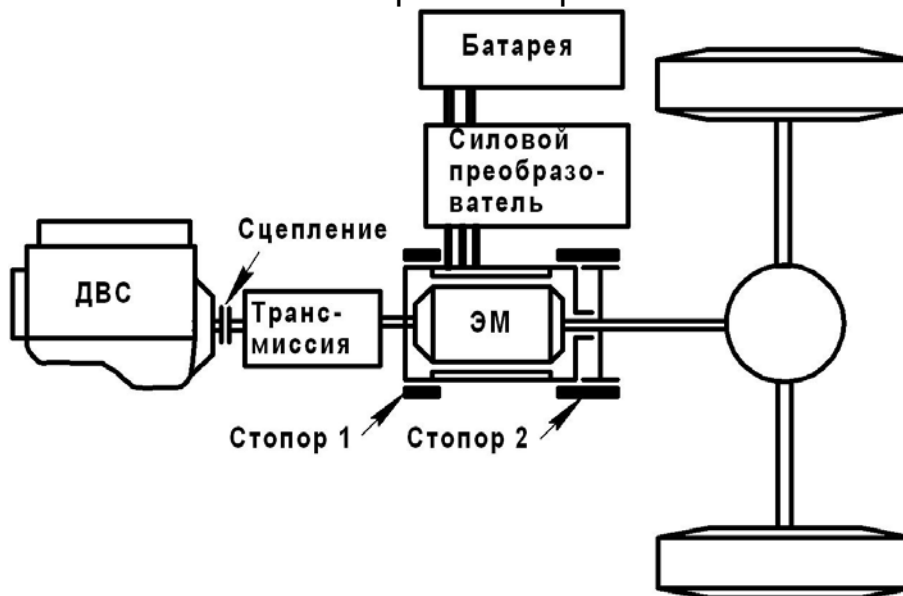


Рис.3.19. ТЭП с электромагнитным скоростным СУ

Выполнение СУ определяется также режимом работы автомобиля.

### 3.4.3. Режимы работы автомобиля с параллельной схемой

Соединительные устройства по моменту и скорости (третья ветвь классификационной схемы) позволяют использовать в автомобилях с КЭУ гибридную цепь привода, в которой могут быть альтернативно выбраны основные факторы силового потока и текущие способы операции, соответствующие режимам работы автомобиля.

С возможностью выбора варианта выполнения СУ упрощается определение принципа управления и области использования операций для оптимизации их работы. Так, например, на низких скоростях способ операции с комбинацией вращающего момента был бы рационален для больших ускорений и преодоления подъемов. С другой стороны, способ комбинации скорости мог бы использоваться для поддержания работы ДВС в оптимальном диапазоне ее изменения в режимах движения автомобиля с высокой скоростью. На рис.3.20 представлены схемы ТЭП с КЭУ и силовых потоков мощности для различных режимов работы автомобиля.

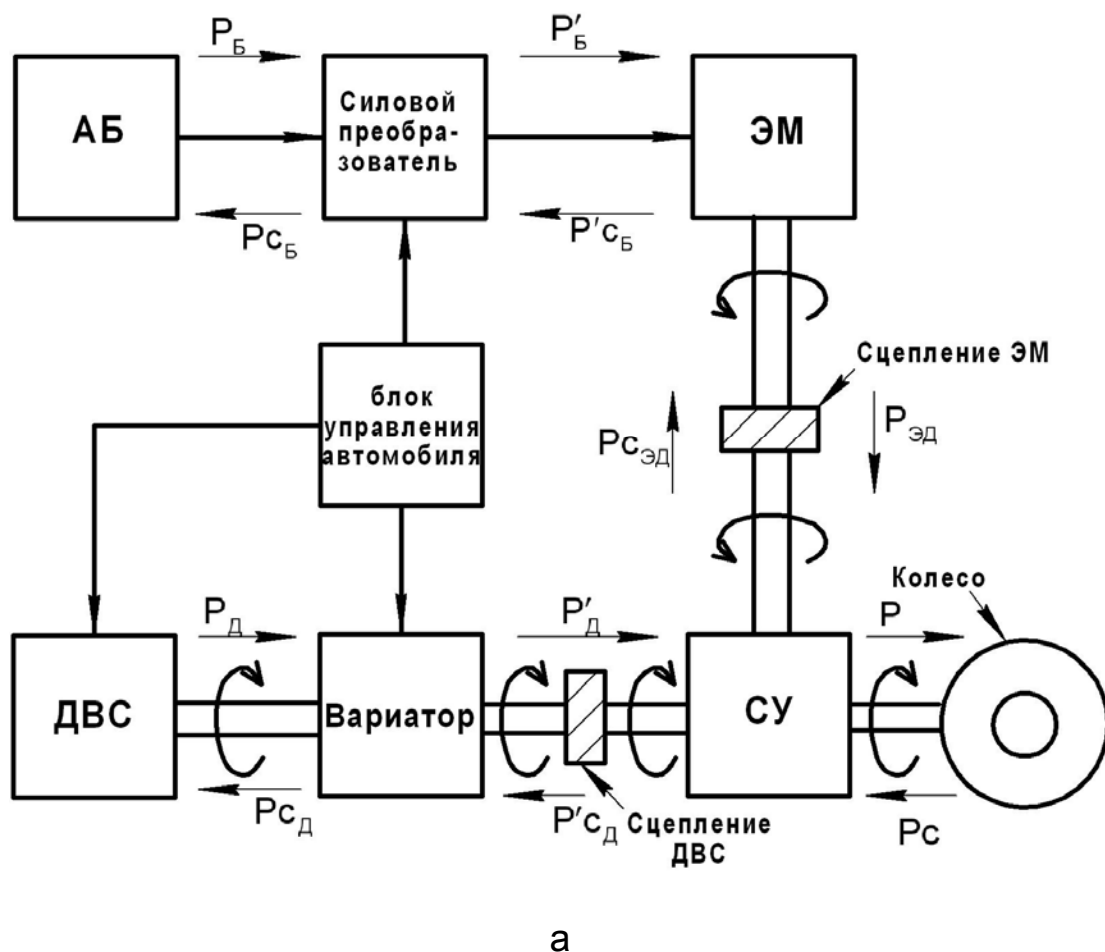
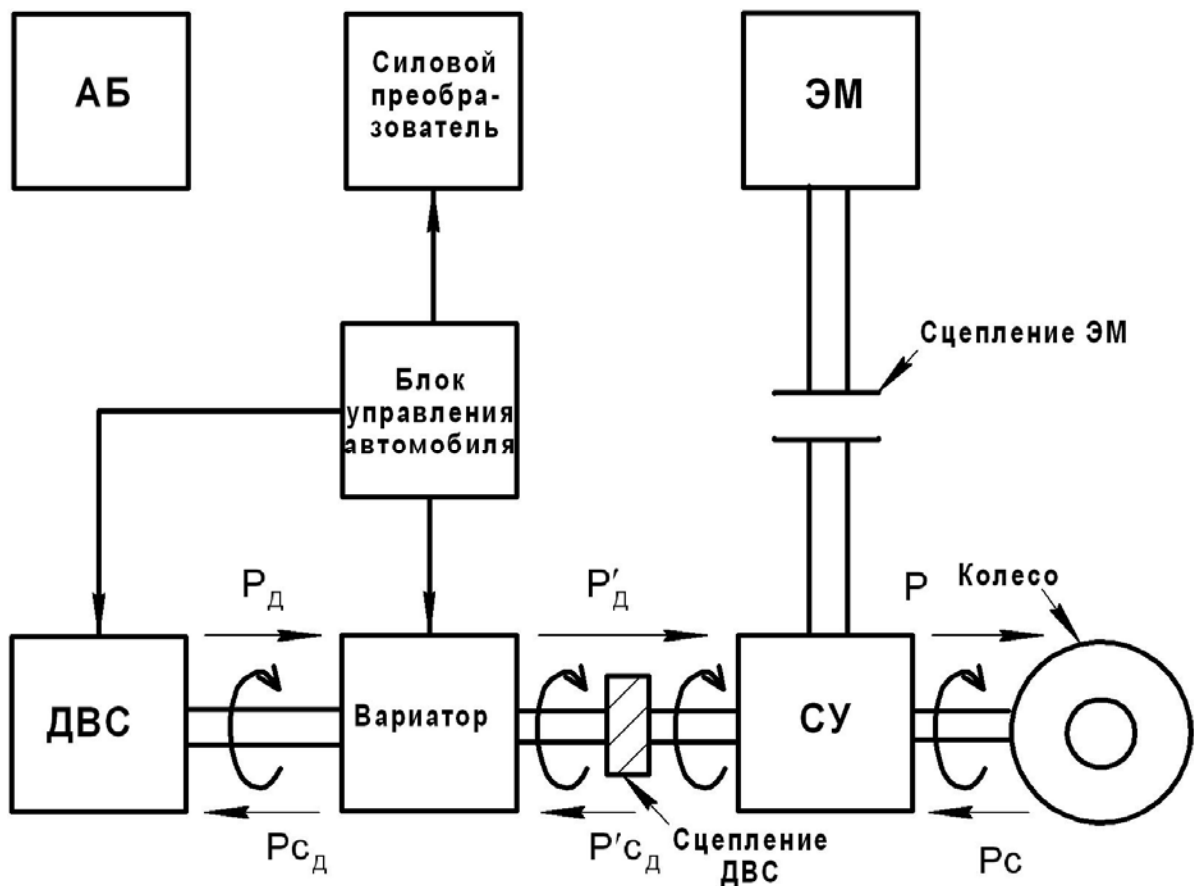


Рис 3.20,а соответствует режиму работы автомобиля, при котором на соединительное устройство поступают два мощностных

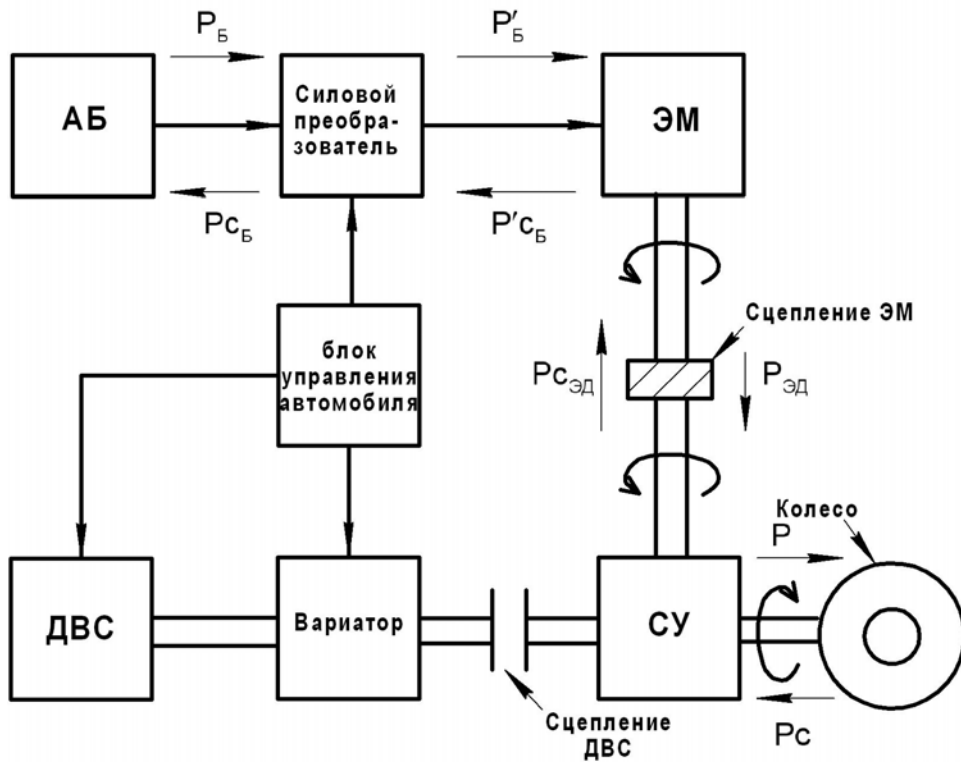
потока от ДВС и ЭМ. Режим предназначен для тяжелых дорожных условий движения (большой подъем, глубокий снег и д.р.).



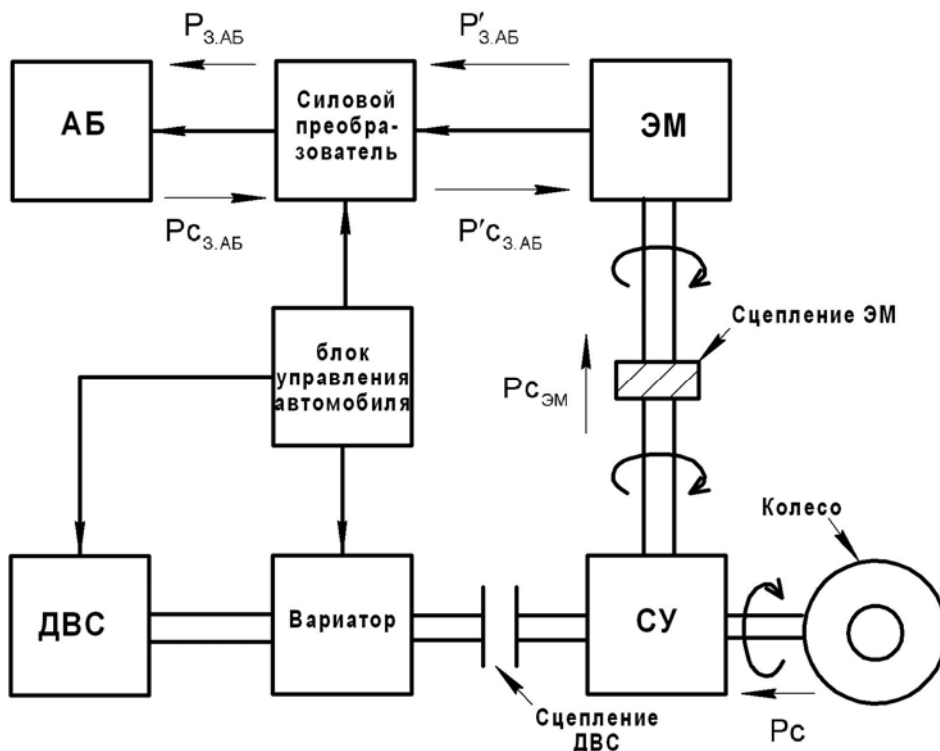
б

Режим работы одного теплового двигателя показан на рис.3.20,б. ЭМ отключена, и разряд батареи отсутствует. Сцепление ДВС включено, и крутящий момент поступает к ведущим колесам. Передача имеет оптимальное передаточное отношение и обеспечивает его поддержание для минимального расхода топлива тепловым двигателем.

Наиболее значительным режимом работы для поддержания низкого расхода топлива является режим электрической тяги рис.3.20,в. В этом режиме тепловой двигатель не работает. Сцепление электродвигателя включено, а сцепление ДВС выключено. ЭМ работает в режиме двигателя, и силовой поток передается соединительному устройству.



В



Г

Рис.3.20. схемы ТЭП с КЭУ и силовых потоков мощности для различных режимов работы автомобиля: а – режим работы ДВС и электродвигателя; б – режим работы ДВС; в – режим работы электродвигателя; г – генераторное торможение

Режим генераторного торможения показан на рис.3.20,г. Сцепление ДВС выключено. ЭМ работает в режиме генератора. Вырабатываемая генератором энергия накапливается в батарее.

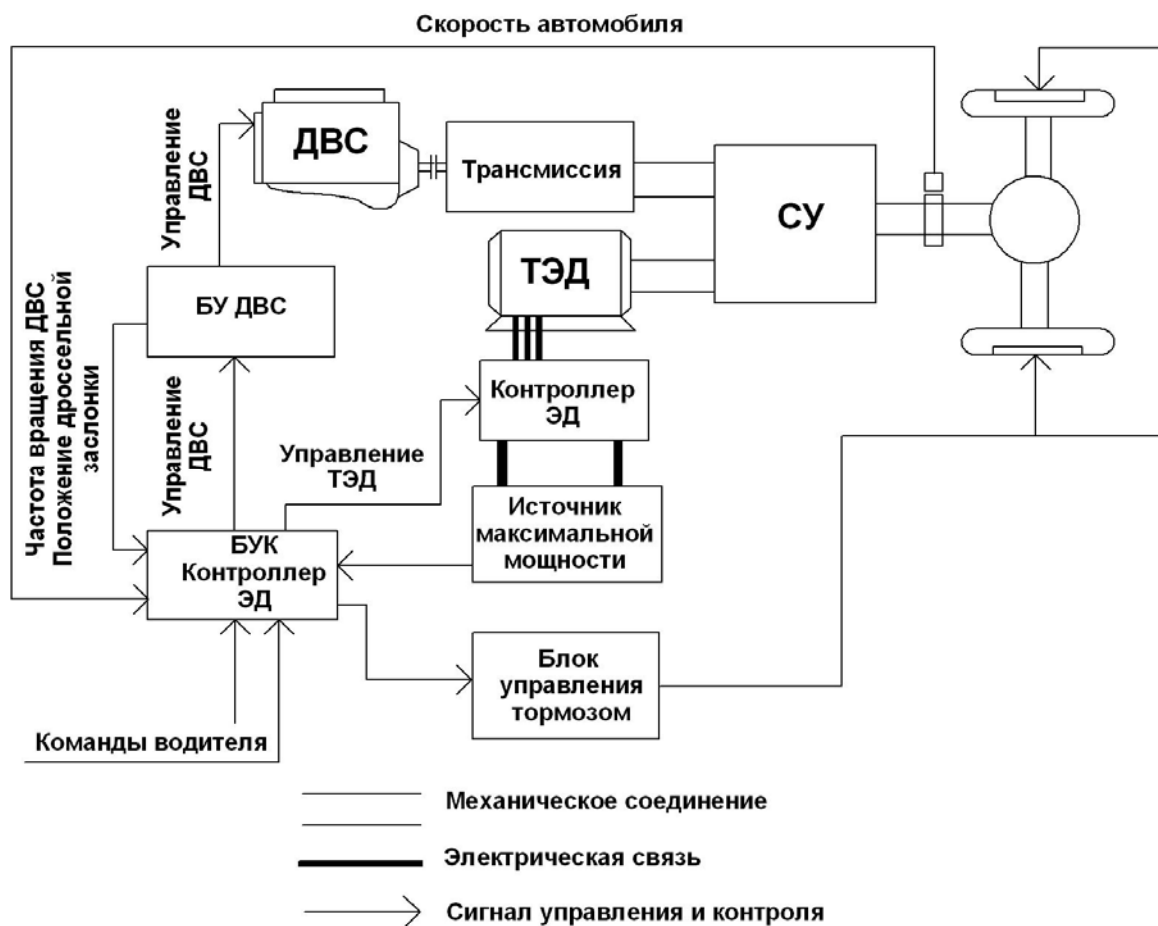
#### 3.4.4. Функциональная схема ТЭА с КЭУ

Функциональная схема ТЭА, выполненного по параллельной схеме, представлена на рис 3.21.а. Кроме элементов силовой части привода схема содержит блоки систем управления.

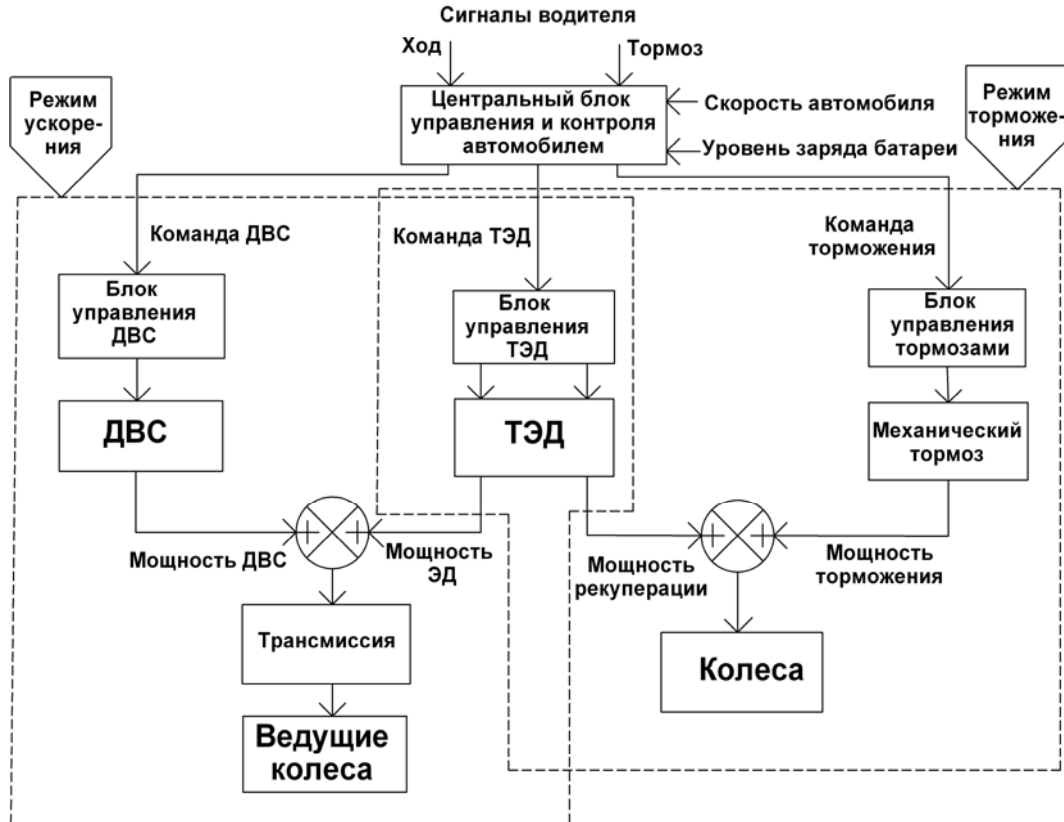
В состав схемы ТЭА входят блоки ДВС, ТЭД, трансмиссии, источник максимальной мощности, а также центральный и местные блоки системы управления.

По составу основных компонентов функциональная схема параллельного привода аналогична соответствующей схеме последовательной структуры ТЭА. Дополнительным элементом силовой цепи привода является соединительное устройство (СУ), объединяющее силовые потоки теплового (ДВС) и тягового (ТЭД) двигателей.

Дополнительные элементы системы управления ТЭА представлены ниже в функциональной схеме СУ.







б

Рис.3.21. Функциональная схема: а –ТЭА с КЭУ (параллельная схема ТЭА); б – системы управления ТЭА с КЭУ

Функциональная схема системы управления ТЭА, выполненной по параллельной схеме, представлена на рис. 3.21.б).

Система содержит два уровня блоков управления. На верхнем (высоком) уровне находится центральный блок управления и контроля автомобиля, функционирующий как командный блок, формирующий и посылающий управляющие сигналы блокам управления нижнего уровня – блокам управления тепловым двигателем (ДВС), тяговым электродвигателем (ТЭД) и механическим тормозом. Формирование центральным блоком управляющих сигналов производится на основании команд оператора и сигналов обратных связей от блоков нижнего уровня.

### 3.4.5. Стратегии управления работой автомобиля с ТЭП, выполненного по параллельной схеме

#### 1 Стратегия поддержания максимального уровня заряда источника пиковой мощности (Max SOC – of – PPS)

Периодический разряд источника пиковой мощности и необходимость обеспечения работоспособности автомобиля

требуют непрерывного контроля за поддержанием максимального уровня его заряда.

Рассмотрение основных положений стратегий производится в соответствии с типовыми режимами движения автомобиля, упрощенной структурной схемой ТЭА в составе с ДВС и АБ и графической иллюстрацией, представленной на рис. 3.22.

а) Режим движения от электродвигателя

Скорость автомобиля меньше  $V'$ , где  $V'$  - скорость ниже которой ДВС не работает устойчиво. АБ разряжается.

$$P_{\text{ДВС}} = 0; P_{\text{ЭД}} = \frac{P_{\text{С}}}{\eta_1}; P_{\text{Р.АБ}} = \frac{P_{\text{ЭД}}}{\eta_{\text{ЭД}}},$$

где  $P_{\text{С}}$  – требуемая нагрузочная мощность на ведущих колесах;

$\eta_1$  – КПД передачи от ЭД до ведущих колес;

$P_{\text{Р.АБ}}$  – мощность разряда АБ;

$P_{\text{ЭД}}$  – мощность ЭМ в режиме электродвигателя;

$\eta_{\text{ЭД}}$  – КПД электродвигателя.

б) Режим движения от ДВС и ЭД ( $P_{\text{С}} > P_{\text{ДВС.опт}}$ ).

Требуемая нагрузочная мощность ДВС, представленная в точке А, больше мощности ДВС при его работе на оптимальной рабочей характеристике. ДВС с помощью дроссельной заслонки переводится в оптимальный режим на характеристику (3). Остальную мощность от кривой (3) до точки А поставляет ЭД.

$$P_{\text{ЭД}} = \frac{P_{\text{С}} - P_{\text{ДВС}} \eta_2}{\eta_1}; P_{\text{Р.АБ}} = \frac{P_{\text{ЭД}}}{\eta_{\text{ЭД}}},$$

где  $\eta_2$  – КПД передачи от ДВС до ведущих колес;

$P_{\text{Р.АБ}}$  – мощность разряда АБ.

в) Режим движения от ДВС при одновременном заряде АБ ( $P_{\text{С}} < P_{\text{ДВС.опт}}$ ).

Требуемая нагрузочная мощность, представленная в точке Б, меньше мощности ДВС в оптимальном режиме, и уровень заряда АБ меньше максимального уровня. В этом случае контроллер ЭМ переводит машину в режим работы генератором, ротор которого вращается за счет ДВС, и ДВС выходит на оптимальную характеристику.

$$P_{\text{З.АБ}} = (P_{\text{ДВС}} - \frac{P_{\text{С}}}{\eta_2}) \eta_3; P_{\text{ДВС}} = P'_{\text{С}} + P'_{\text{З.АБ}},$$

где  $\eta_3$  – КПД передачи от ДВС до АБ.

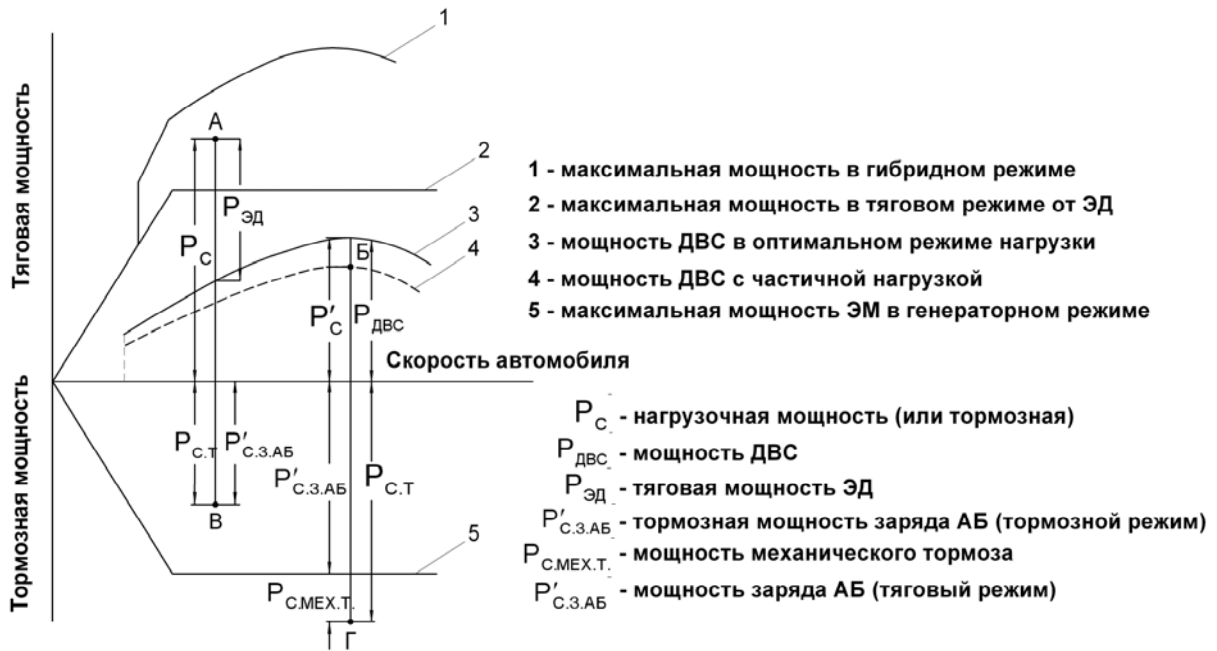


Рис.3.22 Стратегия управления (Параллельная схема)

г) Режим движения от ДВС ( $P_C < P_{ДВС.опт}$ ).

Требуемая нагрузочная мощность, представленная в точке Б, меньше мощности ДВС на оптимальной рабочей характеристике, а уровень заряда АБ имеет максимальное значение. ДВС работает на частичной характеристике (4), реализуя движение автомобиля.

$$P_{ДВС} = \frac{P_C}{\eta_2}; P_{ЭД} = 0; P_{З.АБ} = 0.$$

д) Режим рекуперативного торможения.

Когда требуемая тормозная мощность меньше максимальной мощности рекуперативного торможения, которую может поддерживать электрическая система (в точке В на рис.3.22), электродвигатель переводится в генераторный режим и заряжает АБ.

$$P_{С.Т} = \frac{P_{С.З.АБ}}{\eta_4} = P'_{С.З.АБ}; P_{С.З.АБ} = P_{С.Т} \eta_4,$$

где  $\eta_4$  – КПД передачи от колеса до АБ.

е) Режим комбинированного торможения.

Когда требуемая тормозная мощность превышает максимальную мощность рекуперативного торможения, которую может обеспечить электрическая система (на рис.3.22), необходимо использование дополнительного торможения с помощью механического тормоза.

$$P_{C.T.} = \frac{P_{C.3.AB}}{\eta_4} + P_{C.MEX.T} = P'_{C.3.AB} + P_{C.MEX.T}$$

где  $P_{C.MEX.T}$  – тормозная мощность, создаваемая механическим тормозом

Схема алгоритма управления представлена на рис. 3.23.

## 2 Стратегия включения/отключения ДВС (Engine – On – Off)

В основном своем содержании аналогична стратегии управления включением и отключением ДВС в ТЭА, принятой для последовательной схемы.

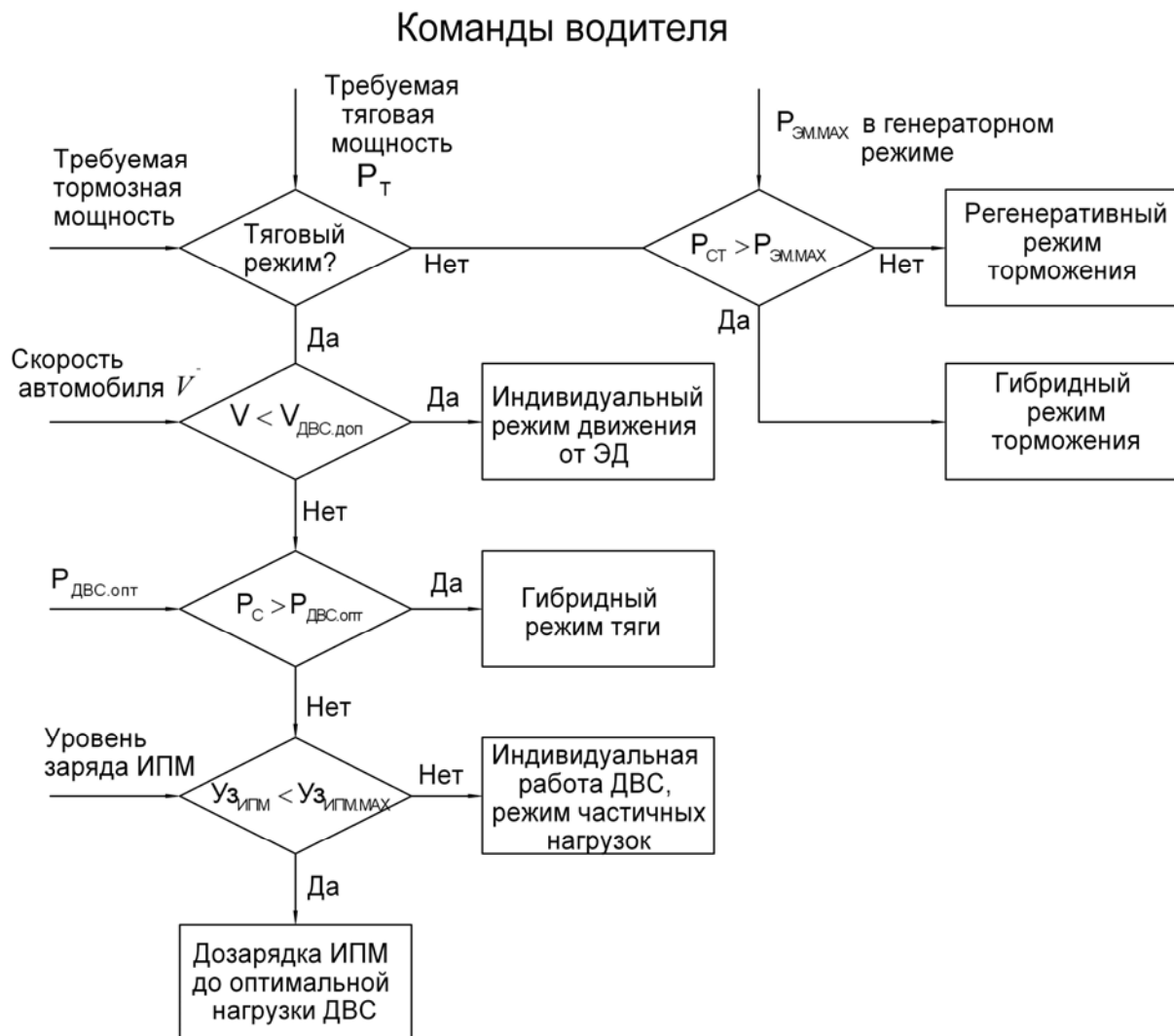


Рис. 3.23. Схема алгоритма стратегии управления

### 3.5. Модификации ТЭА с КЭУ

Как отмечалось в п. 3.2, кроме основных типов ТЭА, возможны выполнения их модификаций, позволяющих отойти от исходных типовых конфигураций и расширить функциональные качества привода, решив вопросы, связанные с недостатками основных схем.

#### 3.5.1. Легкий гибридный ТЭА

Одним из предлагаемых решений является облегченная конструкция тягового привода с использованием небольшой по мощности электрической машины (ЭМ), соединенной с коленчатым валом ДВС и выполняющей функции стартера и генератора, называемая «мотор/генератором» (М/Г).

В режиме работы двигателем мотор/генератор целесообразно использовать не только для пуска ДВС, но и для создания дополнительного момента при трогании автомобиля с места. В режиме движения автомобиля ЭМ выполняет функции двигателя, реализуя режим тяги совместно с ДВС, а в режиме торможения – конвертирует энергию торможения для заряда АБ.

Наличие в ТЭА дополнительной ЭМ малой мощности – отличительный признак так называемого «мягкого» гибрида (Mild Hybrid). Легкий гибридный привод не потребляет от АБ большой мощности, а такие компоненты силовой цепи, как двигатель, трансмиссия и тормозное устройство не требуют больших изменений.

Выполнение структурных схем легкого гибридного привода автомобиля возможно в различных вариантах

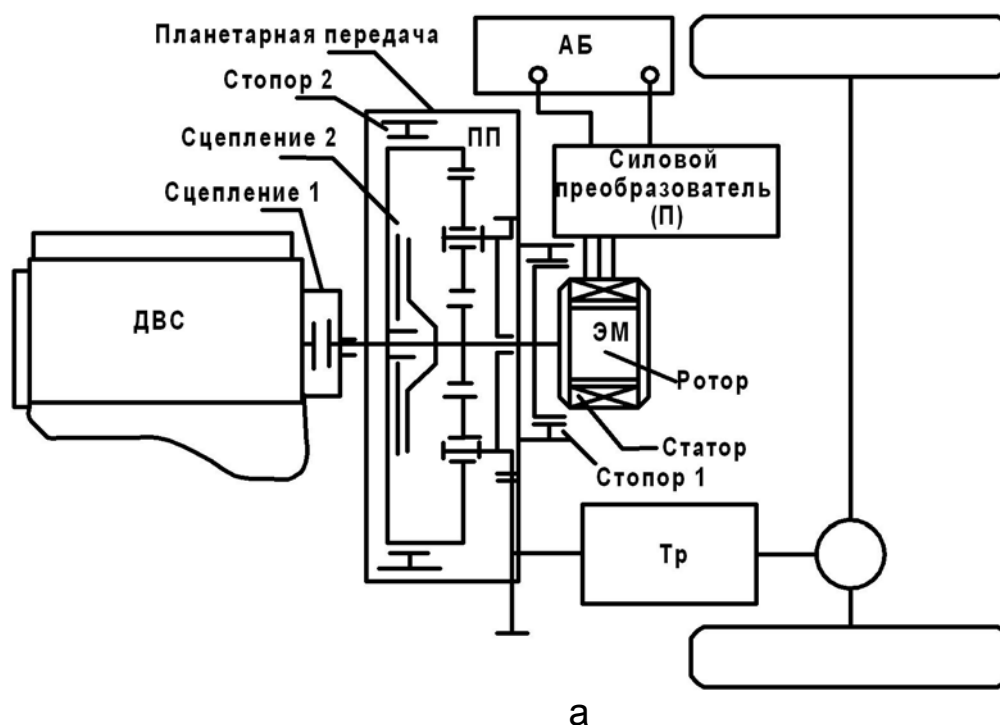
##### 3.5.1.1. Последовательно-параллельный легкий гибридный ТЭА

1. Последовательно-параллельный легкий гибридный ТЭА с планетарной передачей

Структурная схема мягкого гибридного ТЭА приведена на рис.3.24,а.

Основные компоненты схемы – тепловой двигатель (ДВС), электрическая машина (ЭМ) с силовым преобразователем (П), аккумуляторная батарея (АБ), планетарная передача (ПП), трансмиссия (Тр), сцепления и блокировки. Двигатель соединен с кольцевой передачей планетарного механизма, а электрическая машина – с солнечной передачей (конфигурация планетарного механизма рассмотрена на рис.3.17 применительно к СУ параллельной схемы ТЭА). Планетарная передача является

скоростным соединительным устройством, относящимся ко второй классификационной группе СУ.



## 2. Последовательно-параллельный легкий гибридный ТЭА с электромагнитным соединительным устройством

Как альтернатива легкого гибридного ТЭА, выполненного по схеме с планетарной передачей, может быть предложен привод с использованием электрической машины с плавающим статором, конструктивные особенности которого рассмотрены в п. 3.4. на рис. 3.17 применительно в параллельной схеме ТЭА с КЭУ.

Структурная схема последовательно-параллельного мягкого гибридного ТЭА с электромагнитным СУ представлена на рис. 3.24,б.

В этом приводе электрическая машина, кинематически связанная с ДВС, заменяет планетарную передачу и электрическую машину обычной конструкции. Как отмечалось в гл. 3, угловая скорость ротора равна сумме угловой скорости статора и относительной угловой скорости между статором и ротором, т.е.

$$\omega_r = \omega_s + \omega_{rr},$$

где:  $\omega_s$  – угловая скорость статора;

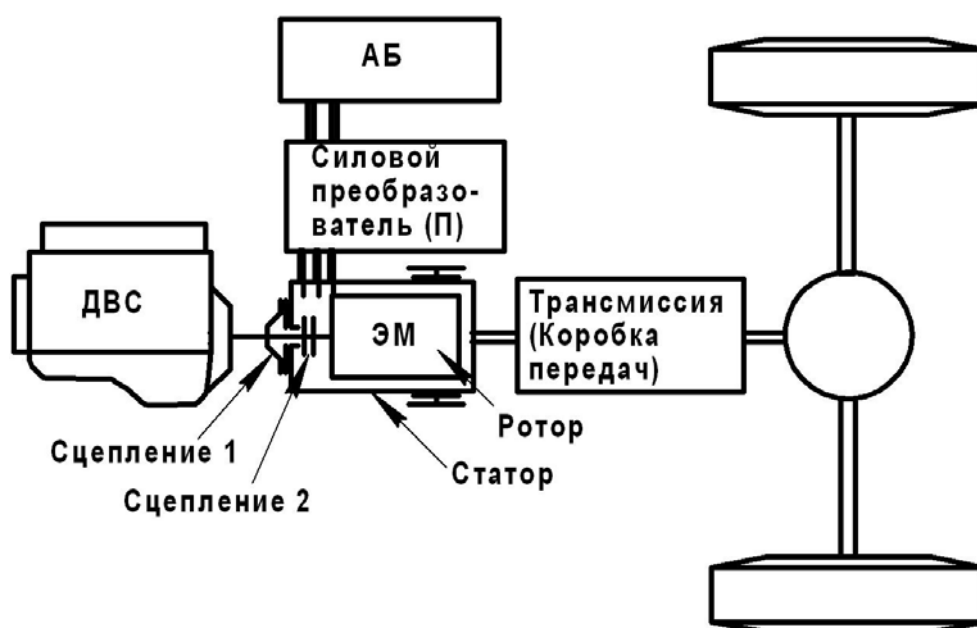
$\omega_{rr}$  – угловая скорость ротора относительно статора.

Вращающие моменты, действующие на статор и ротор, равны электромагнитному вращающему моменту в воздушном промежутке

$$M_r = M_S = M_{MG},$$

где  $M_{MG}$  - электромагнитный момент в воздушном промежутке.

Планетарная передача и плавающий статор имеют одинаковое функциональное назначение. В обоих случаях мягкий гибрид автомобиля реализует одну стратегию управления. Однако разработка привода с планетарной передачей более рациональна, так как позволяет выбирать передаточное число для изменения величины вращающего момента двигателя в соответствии с режимом его работы.



б

Рис. 3.24. Последовательно-параллельный легкий гибридный ТЭА: а – ТЭА с планетарной передачей; б – с электромагнитным СУ

### 3.5.1.2. Параллельный легкий гибридный ТЭА

Структурная схема параллельного легкого гибридного ТЭА представлена на рис. 3.25.

Небольшая по мощности электрическая машина, которая работает как стартер, генератор и электродвигатель, помещается между двигателем и автоматической коробкой передач (КПП). Сцепление используется для отсоединения коробки передач от двигателя при необходимости, например, во время переключения передач и низкой скорости транспортного средства. Мощность электрической машины может находиться в диапазоне примерно от 10% от номинальной мощности двигателя. Электродвигатель может плавно и контролируемо работать на любой скорости и при любом крутящем моменте. Следовательно, разъединение между электрической машиной и передачей не является необходимым.

## **Режимы работы автомобиля**

Возможны несколько режимов работы автомобиля.

**Режим тяги от бензинового двигателя.** В этом режиме электродвигатель отключен и транспортное средство приводится в движение только двигателем. Этот режим может быть использован тогда, когда уровень заряда батареи достаточно высок и двигатель может работать только на движение автомобиля.

**Режим работы только от электродвигателя.** В этом режиме двигатель выключен. Автомобиль приводится в движение только электрическим двигателем. Этот режим может использоваться при низкой скорости движения (например, менее 10 км / ч).

**Режим заряда аккумулятора.** В этом режиме электрическая машина работает как генератор (с приводом от двигателя) для заряда аккумуляторных батарей.

**Режим рекуперативного торможения.** В этом режиме двигатель выключен. Электрическая машина реализует тормозной момент, и часть кинетической энергии транспортного средства преобразуется в электрическую энергию, а силовой поток, меняя свое направление, осуществляет заряд батареи.

**Гибридный режим тяги.** В этом режиме ДВС и электрический двигатель совместно приводят в движение ТС. Силовые потоки складываются.

### **Функциональная схема и стратегия управления**

Функциональная схема параллельного легкого гибридного ТЭА аналогична по построению функциональным схемам основных типов тягового привода ТС и представлена на рис. 3.25 центральным блоком управления и контроля (БУК) высокого уровня и блоком управления ЭМ, выполненным на базе силового преобразователя. Сигналы контроля уровня заряда батареи и скорости автомобиля от датчиков поступают в БУК. Командные сигналы на положение дроссельной заслонки двигателя, силовой преобразователь и КПП направляются с центрального блока в соответствующие органы управления работой привода.

Определение режима работы и скорости движения автомобиля производится водителем через педаль газа или педаль тормоза.

Управление режимами основано на жесткой логике и заложено в контроллер ТС, который получает информацию в режиме реального времени о сигналах от водителя и каждого отдельного местного блока управления. Операционные команды каждому компоненту изменяют настройки в соответствии с заданной логикой управления.



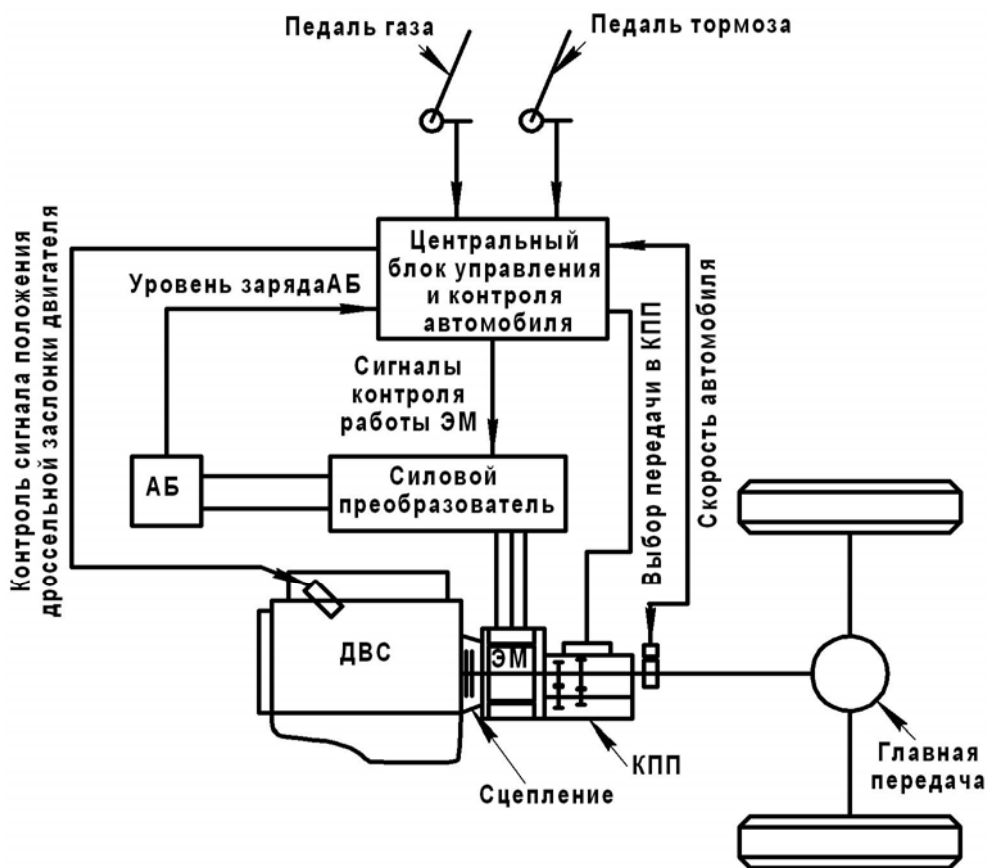


Рис.3.25. Параллельный мягкий гибридный ТЭА

Пример построения предполагаемой логики управления показан в табл. 3.5.1.

Таблица 3.5.1

| Состояние вождения  | Операция контроля  |
|---|--|
| Стоянка   | Оба двигателя отключены  |
| Низкая скорость (менее 10 км/ч)   | Работа только ЭД   |
| Торможение  | Рекуперативное торможение  |
| Режим максимальной мощности (требуемая мощность больше, чем может произвести двигатель) | Совместная работа ДВС и ЭД   |
| Средняя и низкая мощность   | Режим заряда батареи. Работа ДВС (в зависимости от заряда батареи) |

### 3.5.2. Комплексные гибридные ТЭА

Лучшие показатели эффективности привода и расширения его функциональных возможностей могут быть получены за счет дополнительного включения в состав легкого ТЭА тягового электродвигателя с силовым преобразователем. Такое конструктивное решение относится к категории сложных (комплексных) гибридных приводов автомобиля и может выполняться по последовательной, параллельной и смешанной схемам.

#### 3.5.2.1. Последовательная схема комплексного гибридного ТЭА

Структура последовательной схемы комплексного гибридного привода (называемого иногда «строгим» гибридом) по отсутствию кинематической связи теплового двигателя с ведущими колесами соответствует базовой структуре последовательного ТЭА с КЭУ, а по принципу выполнения основной части силовой цепи аналогична ТЭП большегрузного автомобиля с однотипной энергетической установкой.

В состав привода входят тепловой двигатель (ДВС), мотор/генератор (М/Г) с силовым преобразователем ( $P_1$ ), аккумуляторная батарея (АБ) и тяговый электродвигатель (ТЭД), механически соединенный с ведущими колесами, рис. 3.26. Ввиду отсутствия кинематической связи колес с ДВС мощность ТЭД должна соответствовать максимальному значению нагрузки, а мощность, передаваемая в буферный накопитель, – быть не меньше средней мощности ездового цикла. Количество ведущих осей выполняется различным. Наиболее перспективным типом ТЭА является индивидуальный мотор-колесный привод.

Преобразование передаваемой энергии источников в электрическую форму позволяет реализовать новые технические и конструктивные решения ТЭА и обеспечить свободный выбор компоновки отдельных составляющих привода, каждый из которых (в том числе ДВС и мотор-генератор) может быть размещен в любом удобном месте.

Возможность исключения из состава привода ряда составляющих механической части трансмиссии значительно уменьшает массу силового оборудования и момент инерции привода. В гибридном ТЭА с мотор-колесами общее снижение массы за счет исключения механических узлов, уменьшения мощности ДВС и экономии топлива может компенсировать потери от двойного преобразования энергии.

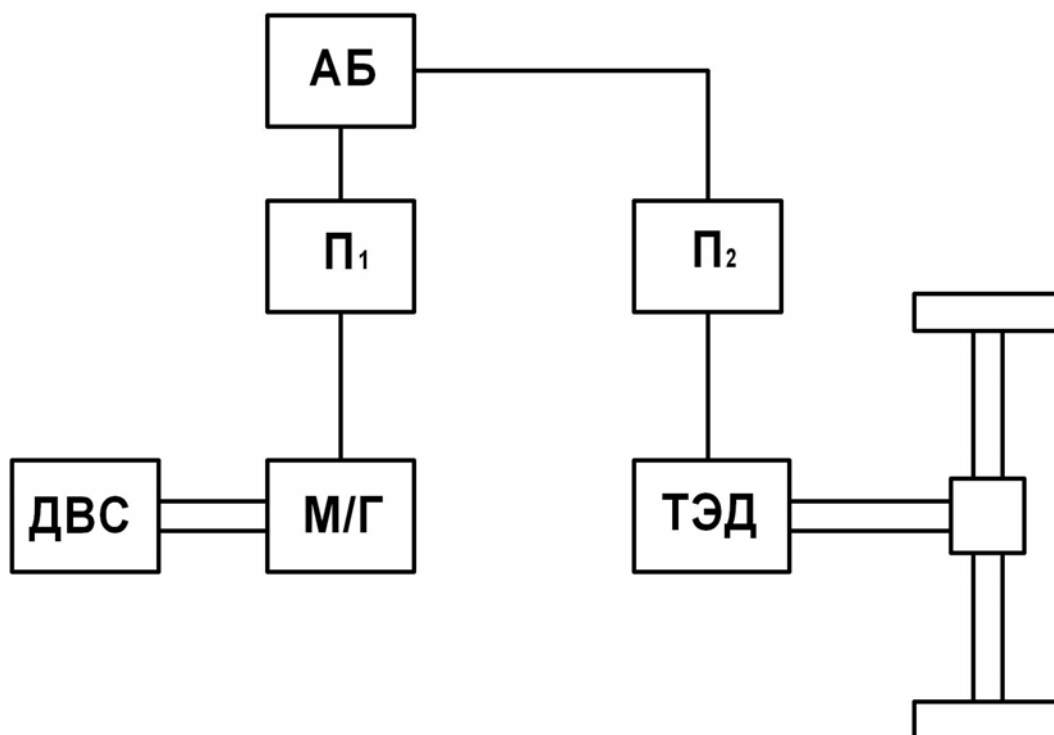


Рис. 3.26. Последовательная схема комплексного гибридного ТЭА

### 3.5.2.2. Параллельная схема комплексного гибридного привода

Как отмечалось, основным принципом построения параллельной схемы привода является возможность механического соединения ДВС с ведущими колесами автомобиля. Поток электрической энергии передается параллельно. При параллельной схеме можно использовать тяговый электродвигатель, обеспечивающий порядка 20...30% мощности, необходимой для движения автомобиля. Рациональное распределение мощностей между источниками в параллельной комплексной гибридной схеме определяется режимами движения и условиями эксплуатации автомобиля.

Применяются различные варианты выполнения структурных схем параллельного комплексного гибридного привода автомобиля. Кроме типовых схем с явно выраженной параллельной электрической ветвью (рис. 3.27) и объединением силовых потоков через соединительные устройства (гл. 3, п.3.4.2), возможны схемы их сложения с расположением ДВС, М/Г и ТЭД на одной оси («осевая» схема трансмиссии), по которой механические и электромеханические потоки могут передаваться совместно и параллельно.

Примером выполнения таких схем может служить трансмиссия автомобиля компании Daimler Chrysler, выполненная по параллельной схеме, в состав которой входят ДВС, два электродвигателя,

сцепление и автоматическая коробка передач с подводом тяговой мощности к задним ведущим колесам (рис. 3.28).

Другой вариант выполнения параллельной схемы – с подводом механического и электромеханического силовых потоков к различным ведущим колесам (от ДВС и М/Г соответственно).

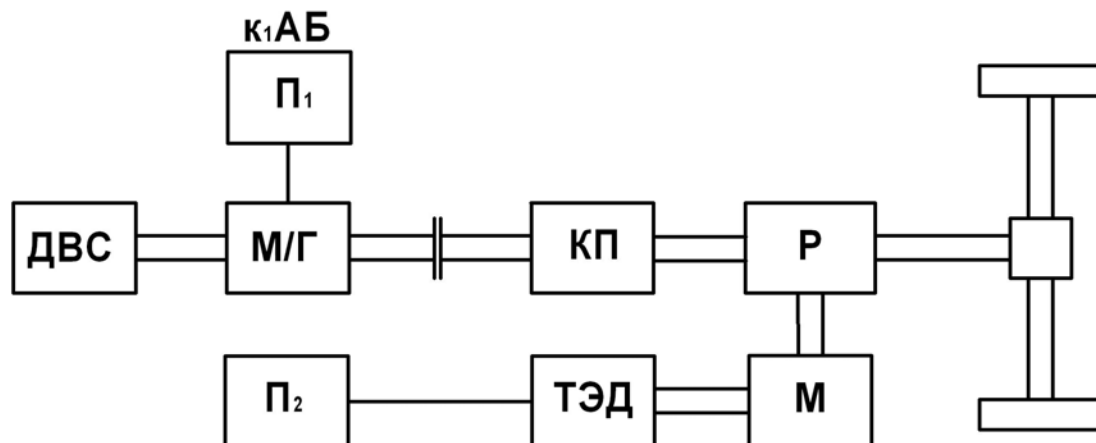


Рис. 3.27. Параллельная схема комплексного гибридного ТЭА с СУ

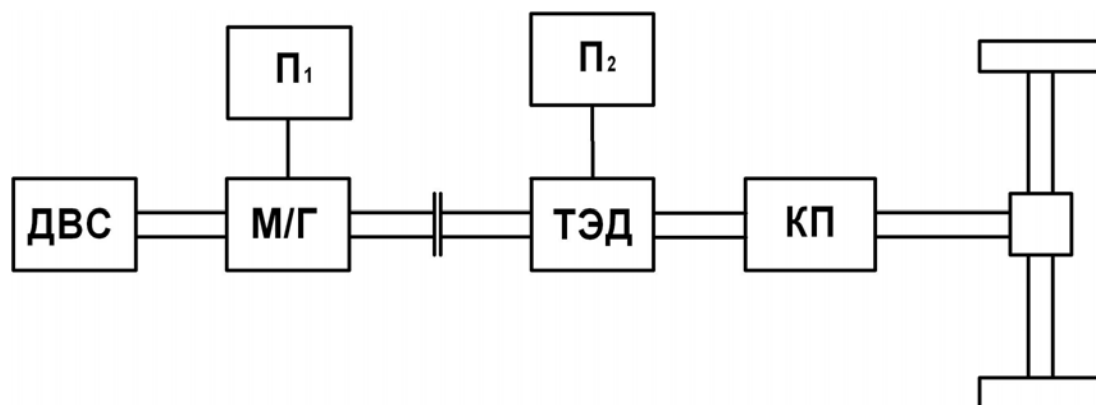


Рис. 3.28. Параллельная схема комплексного гибридного ТЭА с осевой структурой

Возможны также модификации смешанных схем гибридного ТЭА, выполненные на основе комбинации представленных выше модификаций и подвода энергии к разным ведущим осям ТС.

В смешанных схемах силовые потоки оси двигателей разделяются. Поток оси ДВС и М/Г подводятся к двум входам планетарного редуктора, а его выходной вал соединен с валом тягового электродвигателя. Такая схема при относительно небольших мощностях машин позволяет эффективно управлять силовыми потоками и режимом работы ДВС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Современное состояние систем ТЭА характеризуется многообразием их конструктивных выполнений и функциональных задач, решаемых посредством привода

2. В развитии систем ТЭА проявляется непрерывный процесс качественного изменения их структур, связанный с разработкой новых модификаций выполнения тягового электропривода.

3. Классификация электрооборудования ТЭА по принципам однотипности и комбинированности энергоустановок предполагает возможность их дальнейшего параллельного развития в указанных направлениях, оценка тенденций которого (по критериям актуальности и перспективности) позволяет установить:

а) для перспективных систем тягового электропривода легковых автомобилей с однотипной энергоустановкой – это электромобиль, реализуемый в настоящее время в виде технологических транспортных средств с небольшими пробегами. Электромобиль с новейшими разработками источников электрической энергии, в том числе электромобиль с энергоустановкой на топливных элементах, в будущем может стать стандартным типом легкового автомобиля;

б) для автомобилей большой и повышенной грузоподъемности перспективен теплоэлектрический привод, выполненный по последовательной схеме «Тепловой двигатель – генератор – преобразователь – мотор-колесо», и на основе совершенного силового электрооборудования;

в) автомобиль с КЭУ актуален, так как в настоящее время и в ближайшем будущем позволяет обеспечить большую дальность пробега и частичное решение вопросов экологии при одновременном сохранении существующей инфраструктуры заправки;

г) нельзя согласиться с мнением об актуальности автомобилей с КЭУ только на «переходный период». С развитием и совершенствованием структур ТЭА, тепловых двигателей, электрооборудования и одновременным снижением их коммерческой стоимости применение тягового электропривода с КЭУ можно считать перспективным;

д) более высокая стоимость автомобилей с КЭУ в значительной мере компенсируется лучшей экономичностью и низкими вредными выбросами, что обеспечивает их конкурентоспособность и при многостороннем подходе к оценке стоимости автомобиля будет способствовать ее снижению.

4. Общее направление в разработке современного тягового электропривода автомобиля – переход к системам и электрооборудованию переменного тока.

В среднем диапазоне мощности наибольшее применение находит ТЭА с асинхронным и синхронным двигателями. Асинхронный привод имеет лучшие показатели по соотношению стоимости и качества. Основным вариантом выполнения синхронного двигателя является СД с постоянными магнитами. Перспективны также вентильно-индукторный привод и привод с синхронно-реактивным двигателем.

5. Значительное место в системе управления ТЭА занимает электроника, роль которой повышается с интеграций электронных и механических элементов.

Основное направление, обеспечивающее эффективность внедрения электроники в ТЭА – применение силовых преобразователей интегрального исполнения и электронного управления двигателями, основанного на высокочастотном принципе, альтернативой которого является векторное управление.

6. Современный тяговый электропривод автомобиля предъявляет повышенные требования к основным параметрам и показателям электрооборудования, предопределяя разработку соответствующей идеологии и внедрение передовых технологий в области проектирования и производства его компонентов.

## Литература

1. Иванов, А.М. Основы конструкции автомобиля: учебник для вузов / А.М. Иванов [и др.] – М.: За рулем, 2005.
2. Эйдинов, А.А. Электромобили: учебное пособие / А.А.Эйдинов. – М.: НАМИ, 1998.
3. Златин, П.А. Электромобили и гибридные автомобили / П.А. Златин, В.А. Кеменов, И.П. Ксенович. – М.: Агроконсалт, 2004.
4. Ефремов, И.С. Электрические трансмиссии пневмоколесных транспортных средств / И.С. Ефремов [и др.] – М.: Энергия, 1976.
5. Кудин, С.Н. Новый тяговый электропривод карьерных самосвалов БелАЗ / С.Н. Кудин, Н.В. Бигель, А.А. Пехтерев// Автомобильная промышленность. – 2005. – №10.
6. Ксенович, И.П. Идеология проектирования электромеханических систем для гибридной мобильной техники / И.П. Ксенович, Д.Б. Изосимов// Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – №1.
7. Богданов, К.Л. Основы тягового электропривода: учеб пособие/ К.Л.Богданов – М., 1982.
8. Y. Gao, K.M. Rahman, and M. Ehsani, The energy flow management and battery energy capacity determination for the drive train of electrically peaking hybrid, *Society of Automotive Engineers (SAE) Journal*, SP-1284, Paper No. 972647, 1997.
9. Y. Gao, K.M. Rahman, and M. Ehsani, Parametric design of the drive train of an electrically peaking hybrid (ELPH) vehicle, *Society of Automotive Engineers (SAE) Journal*, SP-1243, Paper No. 970294, 1997.
10. Y. Gao and M. Ehsani, *New Type of Transmission for Hybrid Vehicle with Speed and Torque Summation*, U.S. patent pending.
11. Y. Gao and M. Ehsani, *Series-Parallel Hybrid Drive Train with an Electric Motor of Floating Stator and Rotor*, U.S. patent pending.
12. C.C. Chan and K.T. Chau, *Modern Electric Vehicle Technology*, Oxford University Press, New York, 2001.
13. Bosch Automotive, Hand Book, by Robert Bosch Stuttgart, 2000.
14. C.C. Chan and K.T. Chau, *Modern Electric Vehicle Technology*, Oxford University Press, New York, 2001.
15. Y. Gao and M. Ehsani, A mild hybrid drive train for 42V automotive power system, *Society of Automotive Engineers (SAE) World Congress*, Paper No. 2002-02-1082, Detroit, MI, 2002.
16. Y. Gao and M. Ehsani, A mild hybrid drive train with a floating stator motor, *Society of Automotive Engineers (SAE) Future Car Congress*, Paper No. 2002-01-1878, Crystal City, VA, June 2002.

## Оглавление

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 3  |
| 1. Общие вопросы анализа систем тягового электропривода автомобиля.....                          | 4  |
| 1.1. Теоретические и методические основы анализа систем тягового электропривода автомобиля.....  | 4  |
| 1.1.1. Теория силового потока.....   | 4  |
| 1.1.2. Теория характерных процессов.....   | 5  |
| 2. Тяговый электропривод автомобиля с однотипной энергетической установкой.....                  | 7  |
| 2.1. Электромобиль.....  | 7  |
| 2.1.1 Структурная схема ТЭП электромобиля.....   | 8  |
| 2.1.2 Варианты конструктивного исполнения ТЭП Электромобиля.....                                 | 8  |
| 2.1.3 Функциональная схема ТЭП электромобиля.....  | 9  |
| 2.2. Тяговый теплоэлектрический привод автомобиля.....   | 11 |
| 2.2.1. Тяговый электропривод большегрузных автомобилей.....                                      | 11 |
| 2.2.2. Структурные схемы ТЭП БА.....   | 11 |
| 2.2.3. Принципы функционирования ТЭП БА.....   | 13 |
| 3. Системы тягового электропривода автомобиля с комбинированной энергетической установкой.....   | 17 |
| 3.1. Общие принципы функционирования ТЭА с КЭУ.....  | 17 |
| 3.2. Классификация ТЭА с КЭУ.....  | 19 |
| 3.3. Последовательная схема ТЭА с КЭУ.....   | 21 |
| 3.3.1. Структурная схема ТЭА.....  | 21 |
| 3.3.2. Режимы работы автомобиля с последовательной схемой ТЭА с КЭУ.....                         | 23 |
| 3.3.3. Функциональная схема ТЭА с КЭУ.....   | 25 |
| 3.3.4. Стратегия управления работой автомобиля с ТЭП, выполненным по последовательной схеме..... | 27 |
| 3.4. Параллельная схема ТЭА с КЭУ.....   | 30 |
| 3.4.1. Структурная схема ТЭА.....  | 30 |
| 3.4.2. Варианты выполнения параллельных схем ТЭА с КЭУ.....                                      | 31 |
| 3.4.2.1.Силовое СУ.....  | 31 |
| 3.4.2.2.Скоростное СУ.....   | 35 |
| 3.4.3. Режимы работы автомобиля с параллельной схемой.....                                       | 38 |
| 3.4.4. Функциональная схема ТЭА с КЭУ.....   | 41 |
| 3.5. Модификации ТЭА с КЭУ.....  | 46 |
| 3.5.1. Легкий гибридный ТЭА.....   | 46 |
| 3.5.1.1.Последовательно-параллельный легкий гибридный ТЭА....                                    | 46 |
| 3.5.1.2.Параллельный легкий гибридный ТЭА.....   | 48 |
| 3.5.2. Комплексные гибридные ТЭА.....  | 51 |



|  |    |
|--|----|
| 3.5.2.1.Последовательная схема комплексного гибридного ТЭА.... | 51 |
| 3.5.2.2.Параллельная схема комплексного гибридного ТЭА.....    | 52 |
| Заключение.....  | 54 |
| Литература.....  | 56 |

Учебное издание

**БОГДАНОВ** Константин Леонидович

**ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АВТОМОБИЛЯ**

*Редактор* Н.П.Лапина

*Набор и верстка* К.А.Маяков С.А.Якушев

Тем. план 2009г., п. 46

Подписано в печать \_\_\_\_\_ г.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Гарнитура «Ариал». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 3,6. Уч.-изд. л. 2,9.

Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_

Цена 45 руб.

Отпечатано в полном соответствии  
с предоставленным оригинал-макетом  
на ротапинтере МАДИ.

125319, Москва, Ленинградский проспект, 64