

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МАМИ»

Овсянников Е.М.

«Тяговые электроприводы автотранспортных средств»

Учебное пособие

Для направления подготовки: 140400 –
«Электроэнергетика и электротехника»

Одобрено методической комиссией по направлению 14000
«Энергетика, энергетическое машиностроение и электротехника»

Москва, 2013 г.

Ключевые слова

Автотранспортные средства, система тягового привода, двигатель внутреннего сгорания, тяговый электропривод, накопитель энергии, тяговая аккумуляторная батарея, асинхронный электродвигатель, синхронный электродвигатель, вентильный электродвигатель.

Содержание	№ страниц
Системы тягового привода АТС с ТЭП	4
Классификация систем тягового привода АТС с ТЭП	4
Способы построения системы тягового привода АТС с ТЭ	7
Система управления тяговым приводом АТС	14
Рациональные пути совершенствования ТЭП АТС	18
Состояние и перспективы развития элементов ТЭП АТС	21
Критерии оптимизации ТЭП АТС	28
Структуры ТЭП переменного тока	34
Анализ современных систем управления ТЭП переменного тока	34
Системы векторного управления электроприводами переменного тока	34
Системы прямого управления моментом электроприводов переменного тока	38
Системы прямого управления моментом с широтно-импульсным модулятором (ПУМ-ШИМ)	40
Обобщенная структура ТЭП переменного тока	45

Лекции. Тяговый электропривод автотранспортных средств.

Система тягового привода (СТП) современных АТС с ТЭП является сложной электромеханической системой, построенной путем комбинирования различных типов двигателей (минимум одного ТЭД и ДВС (или без него)), источников/накопителей, статических преобразователей электроэнергии, механических передач, включая их подсистемы управления. При отсутствии ДВС можно приравнять СТП к ТЭП.

Сложность СТП в основном зависит от наличия ДВС в системе, способов объединения и распределения потоков мощности двигателей для привода ведущих колес, от количества накопителей электроэнергии. Большое разнообразие компоновочных и конструктивных решений СТП требует классифицировать их структуры, систематизировать их способы построения, стратегии управления, что позволяет правильно выбрать их математическую модель, алгоритмы управления силовыми агрегатами, сравнивать их технико-эксплуатационные показатели, определить основные требования к ТЭП и его пути совершенствования.

1.1. Системы тягового привода АТС с ТЭП: общие сведения

1.1.1. Классификация систем тягового привода АТС с ТЭП

Разработанные к настоящему времени и перспективные СТП АТС можно классифицировать по различным признакам, приведенным на рис. 1.1.

По типу основного источника энергии, применяемого на борту автомобиля, можно выделить три вида АТС: гибридный автомобиль с гибридной силовой установкой на базе ДВС и ТЭД, электромобиль с топливными элементами (ЭМ с ТЭ), получающий питание от ЭХГ и электромобиль с ТАБ.

Для питания ТЭД можно применить различные типы источников/накопителей электроэнергии: ТАБ, ЭХГ, ЕНЭ, маховиковый накопитель энергии (МНЭ), солнечная батарея (СБ) или рациональные комбинации этих источников.



Рис. 1.1. Классификация систем тягового привода АТС с ТЭП

В зависимости от мощности ТЭП (или степени гибридизации – отношения мощности ТЭП к суммарной мощности ГСУ) можно разделить гибридные автомобили на категории: «микрогибрид» (от англоязычного термина micro hybrid), «умеренный» (частичный) гибрид (mild hybrid) и полный гибрид (full hybrid) [178].

Примером «микро» гибрида является ГСУ со стартер-генератором мощностью 5...10 кВт. Одной из важнейших функций, выполняемой стартер-генератором в автомобилях данного класса, является функция «старт – стоп», которая отключает подачу топлива ДВС при скорости движения менее 5..10 км/ч и автоматически осуществляет пуск двигателя для продолжения движения. При наличии достаточно мощного накопителя можно рекуперировать часть накопленной автомобилем кинетической энергии при торможении. Применение стартер-генератора позволяет снизить расходы топлива ДВС 8...15%.

Мощность ТЭП в «умеренных» гибридах обычно не превышает 20 кВт, что дает возможность экономии топлива 10...20%. В «полных» гибридах оборудован ТЭП с мощностью, достаточной для обеспечения движения АТС электрической тягой по заданному пробегу. По данным производителей при такой мощности ТЭП удалось снизить удельные расходы топлива 40...50% при движении по городским ездовым условиям. Гибридные автомобили, заряжаемые от внешней сети, относятся к категории полного гибрида.

В ТЭП АТС применены различные типы ТЭД: постоянного тока, синхронные с электромагнитным возбуждением, асинхронные, синхронные с постоянными магнитами, причем широкое распространение получают последние два типа электрических машин, а перспективными могут быть вентильно-индукторные и синхронные реактивные машины.

Среди признаков классификации СТП АТС наиболее значимым является способ передачи потоков мощности двигателей ведущим колесам, в зависимости от которого традиционно различают три структуры СТП: последовательная, параллельная и параллельно-последовательная.

В последовательной структуре ведущие колеса приводит ТЭД, питаемый от последовательно соединенной с ним установки «ДВС – генератор» и накопителя электроэнергии (НЭ), который может быть заряжен избыточной энергией ДВС или энергией, рекуперированной ТЭД при торможении. Характерной особенностью данной структуры СТП является отсутствие механической связи между ДВС и ведущими колесами. СТП электромобилей можно перечислить к данной структуре.

В параллельной структуре движение АТС может быть обеспечено ДВС и ТЭД, как раздельно, так и совместно. ДВС имеет механическую связь с ведущими колесами.

В параллельно-последовательной структуре поток мощности ДВС может быть разделен на две части: механическую для привода ведущих колес или электрическую – питания ТЭД и заряда НЭ. При этом ДВС может быть связан механически с ведущими колесами, так и не связан.

Способы построения СТП АТС более подробно рассмотрены ниже.

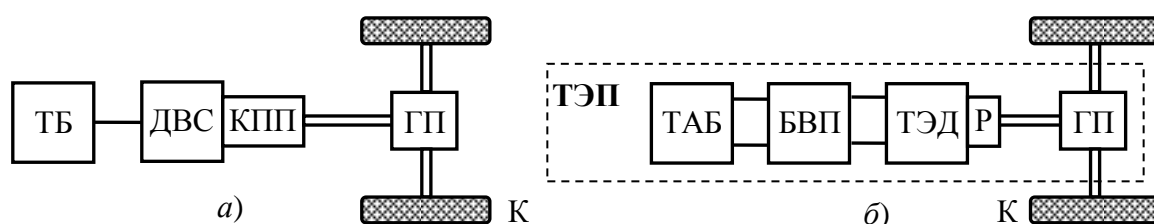
1.1.2. Способы построения системы тягового привода АТС с ТЭП

СТП АТС с ТЭП можно построить путем гибридизации простейших структур СТП ведущих колес классического автомобиля с ДВС (рис. 1.2, а) и электромобиля (ЭМ) (рис. 1.2, б). На основании классификации СТП гибридных автомобилей, предложенной специалистами французской фирмы «Peugeot-Citroën» [187], ниже приведены уточнения, модернизация способов построения СТП АТС.

Анализ СТП классического автомобиля и электромобиля позволяет представить обобщенную структуру СТП АТС, приведенную на рис. 1.3, в которую входят основные элементы: накопитель или источник энергии; адаптер энергии; двигатель, преобразующий энергию источника в механическую работу; трансмиссия, передающая мощность, развиваемую двигателем к ведущим колесам.

Накопителем энергии в классическом автомобиле является топливный бак, в электромобилях – накопители или источники электроэнергии различного рода (ТАБ, ЕНЭ, ЭХГ, СБ ...). Адаптером энергии является устройство, предназначенное для преобразования параметров энергии без изменения ее вида, например,

электрические трансформаторы, бортовые вентильные преобразователи (БВП) и т.п. В составе механической трансмиссии (ТМ) условно включены все функциональные механизмы, предназначенные для передачи потоков механической мощности от двигателя к ведущим колесам и обратно: сцепление, КПП, главная передача (ГП), карданная передача, дифференциальный механизм, редуктор (Р) и т.д. Работы силовых агрегатов координируются системой управления АТС.



ТБ – топливный бак; ГП – главная передача с дифференциалом;
 К – ведущие колеса; БВП – бортовой вентильный преобразователь; Р - редуктор

Рис. 1.2. Система тягового привода классического автомобиля (а), электромобиля (б)

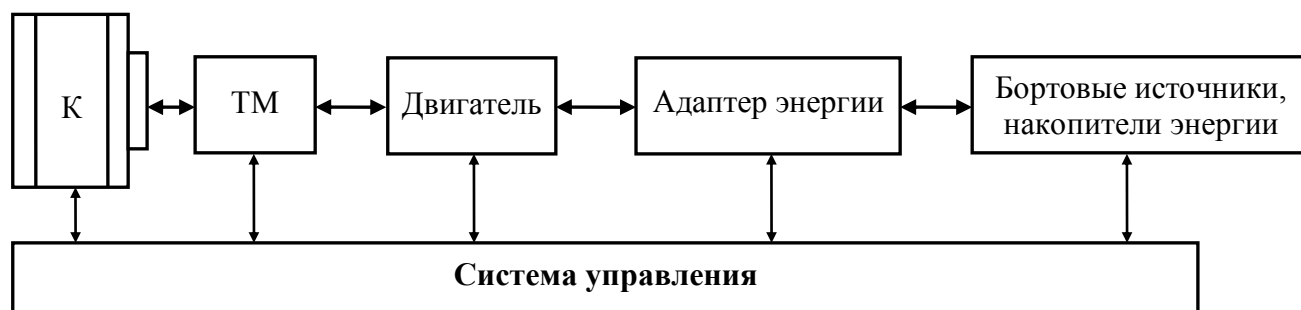


Рис. 1.3. Обобщенная система тягового привода АТС

Используя связи элементов одного типа, входящих в две и более обобщенные СТП, можно построить различные варианты гибридных тяговых систем. Данные связи будем называть «элементарными».

1-й вариант: применение связи двух обобщенных СТП, образованной двумя парами колеса и дорожным полотном («колеса ↔ дорога ↔ колеса»), позволяет получить СТП параллельного типа с отдельным электроприводом осей (рис. 1.4). Вместо двух ТАБ можно использовать одну, которая одновременно питает оба ТЭД. В простейшем виде трансмиссии могут быть одноступенчатыми редук-

торами, в более сложном виде – сцеплением, КПП и т.д. Также можно заменить один канал электропривода механическим приводом от ДВС.

Элементарная связь типа «колеса ↔ дорога ↔ колеса» позволяет получить схемы параллельного гибрида с отдельным приводом осей или индивидуальным приводом колес.

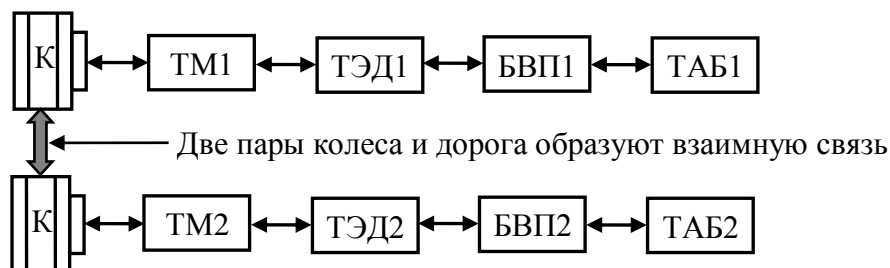


Рис. 1.4. СТП параллельного типа с отдельным электроприводом осей

2-й вариант: элементарная связь «механическая трансмиссия ↔ механическая трансмиссия» позволяет создать СТП параллельного типа с приводом одной оси (рис. 1.5), где механические мощности, развиваемые ДВС и ТЭД, суммируются редуктором или планетарным механизмом.

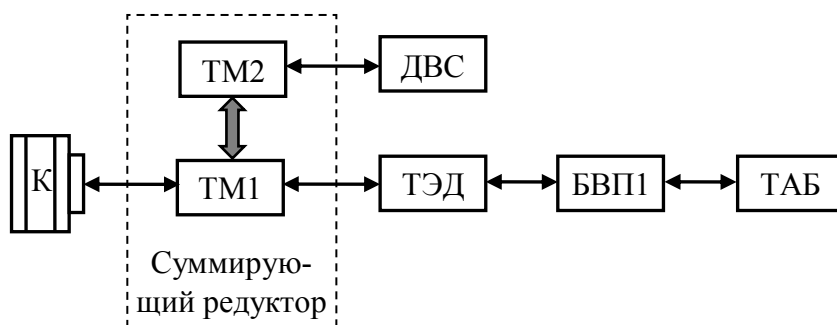


Рис. 1.5. СТП параллельного типа с приводом одной оси

3-й вариант: СТП параллельного типа со стартер-генератором, жестко установленным на валу ДВС (рис. 1.6), или соединенным с ДВС приводным ремнем (рис. 1.7), можно получить с помощью связи «двигатель – двигатель».

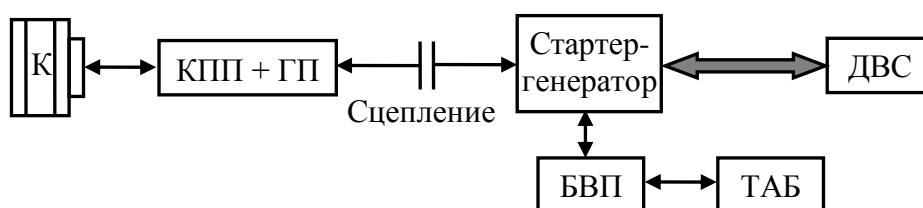


Рис. 1.6. СТП параллельного типа со стартер-генератором, установленным на валу ДВС

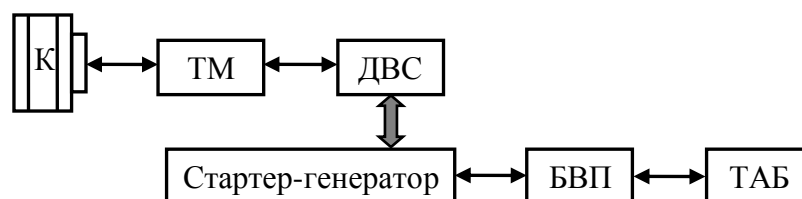


Рис. 1.7. СТП параллельного типа со стартер-генератором, соединенным с ДВС приводным ремнем

4-й вариант: элементарные связи «адаптер энергии ↔ адаптер энергии» и «источник энергии ↔ источник энергии» представляют структуры СТП электромобилей с КЭУ, состоящей из различных типов источников/накопителей электроэнергии. Например, на рис. 1.8 приведена СТП ЭМ с КЭУ, включающей ТАБ и ЕНЭ. В данной структуре имеет место связь типа «адаптер энергии ↔ адаптер энергии» (БВП1 – БВП2), где БВП1 обычно является полупроводниковым преобразователем для управления ТЭД, а БВП2 – для согласования уровней напряжения ЕНЭ и ТАБ. При непосредственном параллельном включении данных источников (т.е. при отсутствии БВП2) справедлива элементарная связь типа «источники энергии» («ЕНЭ ↔ ТАБ»). Здесь и далее называем связи элементов СТП АТС сокращенно. Например, элементарную связь типа «источник энергии – источник энергии» обозначаем «источники», а «двигатель – двигатель» – «двигатели».

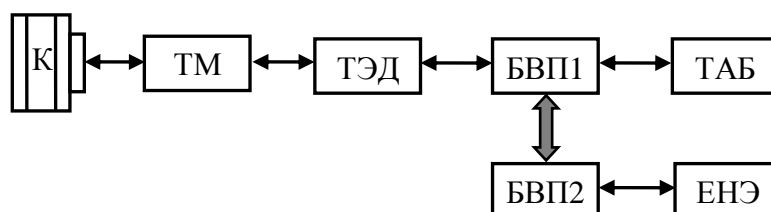


Рис. 1.8. СТП электромобиля с КЭУ, состоящей из ТАБ и ЕНЭ

Ниже более подробно рассмотрим структуру СТП ЭМ с ТЭ.

Анализ систем тягового привода образцов, разработанных различными автомобилестроительными фирмами, позволяет строить обобщенную структуру ТЭП ЭМ с ТЭ, приведенную на рис. 1.9. На данном рисунке также подробно описаны функциональные подсистемы ЭХГ.

В зависимости от необходимости применения накопителя энергии ЭМ с ТЭ можно разделить на два типа: ЭМ с ТЭ (без использования НЭ) и *гибридный* ЭМ с ТЭ (с использованием НЭ) [76, 172].

В ЭМ с ТЭ мощность, необходимая для осуществления всех режимов движения, обеспечивается ЭХГ. По показателям существующих ТЭ можно использовать систему энергообеспечения с ЭХГ, питаемым водородом, сохраняемым на борту электромобиля.

В гибридных ЭМ с ТЭ в качестве НЭ можно использовать ТАБ, ЕНЭ или маховиковый накопитель. НЭ, подключенный параллельно с ЭХГ, обеспечивает пиковые нагрузки при разгоне ЭМ, восстанавливает свою энергию (заряжается) при рекуперативном торможении. Таким образом, имеется возможность использовать преимущества ТЭ (большую удельную энергоемкость) и НЭ (большую удельную мощность). Кроме того, использование НЭ позволяет сократить время ожидания запуска ЭХГ, защитить его от обратных токов и улучшить динамические характеристики транспортного средства. Благодаря применению НЭ можно увеличить ресурс ЭХГ, пробег ЭМ, сократить время заправки топлива.

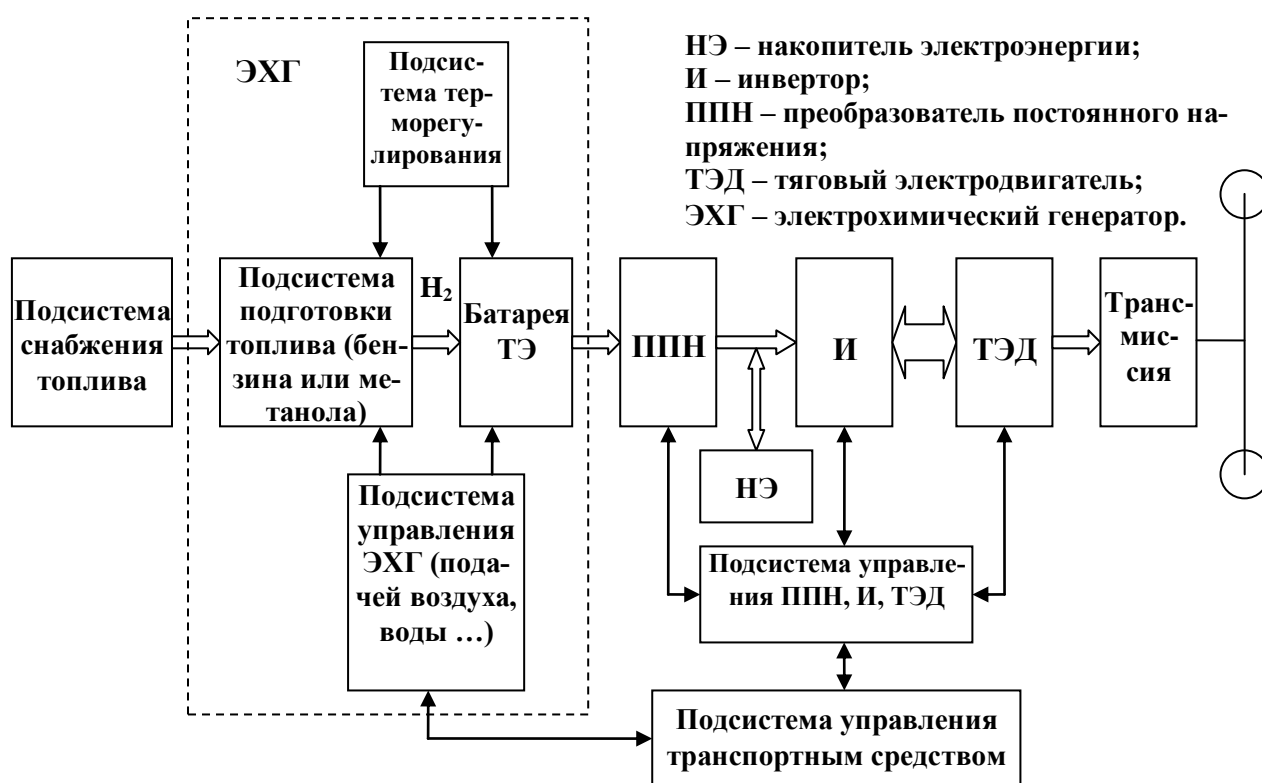


Рис. 1.9. Обобщенная структура ТЭП ЭМ с ТЭ

Путем комбинирования двух и более элементарных связей силовых агрегатов обобщенной СТП, приведенной на рис. 1.3, можно построить «гибридные» СТП с расширенными функциональными возможностями. Например, использова-

ние связей «адаптеры» и «двигатели» позволяет получить традиционную структуру СТП гибридного автомобиля последовательного типа (рис. 1.10).

Из рисунков 1.8...1.10 видно, что СТП электромобилей можно классифицировать как гибрид последовательного типа.

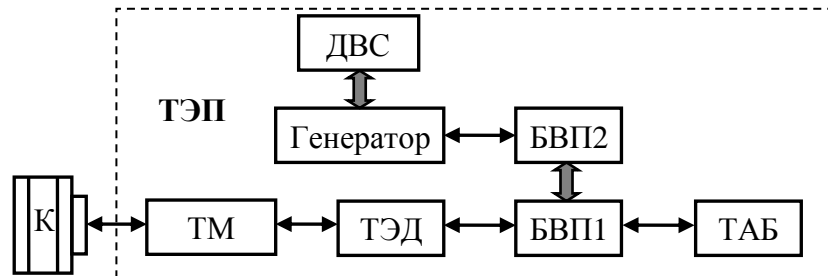


Рис. 1.10. СТП гибридного автомобиля последовательного типа

Комбинация связей «двигатели» (ДВС – ТЭД2), «адаптеры энергии» (БВП1 – БВП2) и «трансмиссии» (ТМ1 – ТМ2) позволяет построить СТП параллельно-последовательного типа с приводом одной оси и стартер-генератором (ТЭД2), установленным на валу ДВС (рис. 1.11). Усложнение схемы по сравнению с параллельной схемой, приведенной на рис. 1.5, дает возможность распределить поток мощности ДВС на две части – механическую и электрическую. Последняя предназначена для питания ТЭД1 при недостаточной мощности ТАБ, или заряда ТАБ при стоянке АТС.

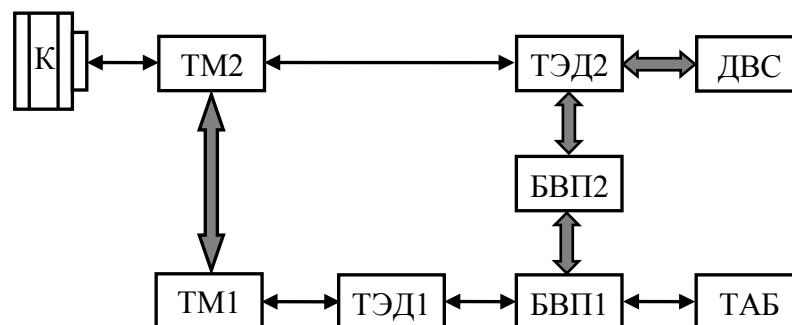


Рис. 1.11. СТП параллельно-последовательного типа с приводом одной оси

СТП параллельно-последовательного типа с отдельным приводом осей можно построить с помощью связей «колеса», «двигатели» (ДВС – ТЭД2), «адаптеры энергии» (БВП1 – БВП2), как показано на рис. 1.12.

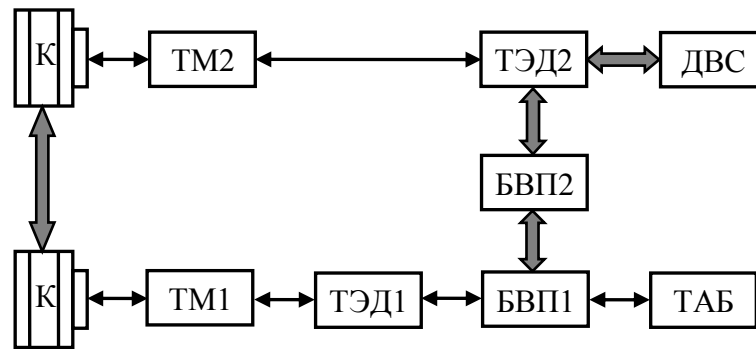


Рис. 1.12. СТП параллельно-последовательного типа с отдельным приводом осей

Параллельно-последовательную схему СТП с механическим приводом одной оси и индивидуальным электроприводом двух колес (рис. 1.13), можно получить путем комбинирования систем, приведенных на рис. 1.4 и 1.6.

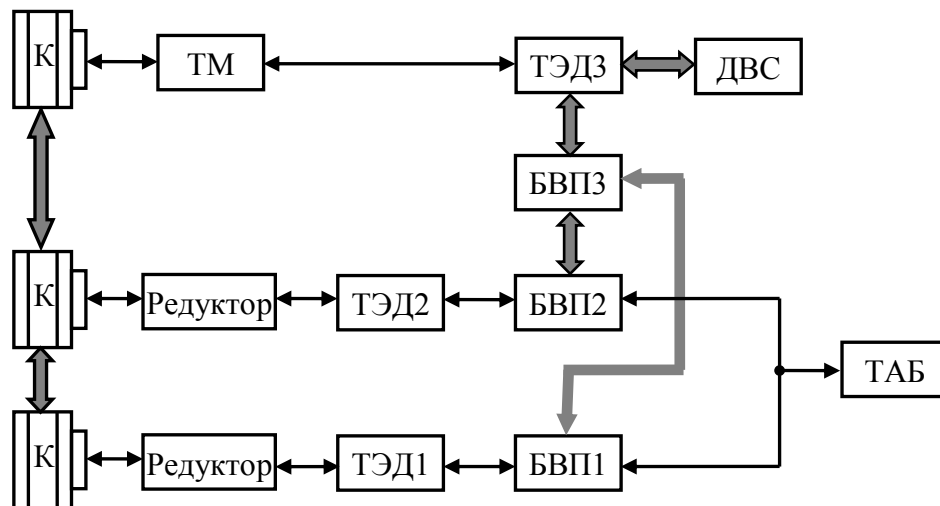


Рис. 1.13. СТП параллельно-последовательного типа с механическим приводом одной оси и индивидуальным электроприводом двух колес

Параллельно-последовательную гибридную тяговую систему также можно создать с помощью более сложной связи типа «механические трансмиссии». Примером СТП данного типа является известная тяговая система гибридного автомобиля «Prius» фирмы Toyota, представленная на рис. 1.14.

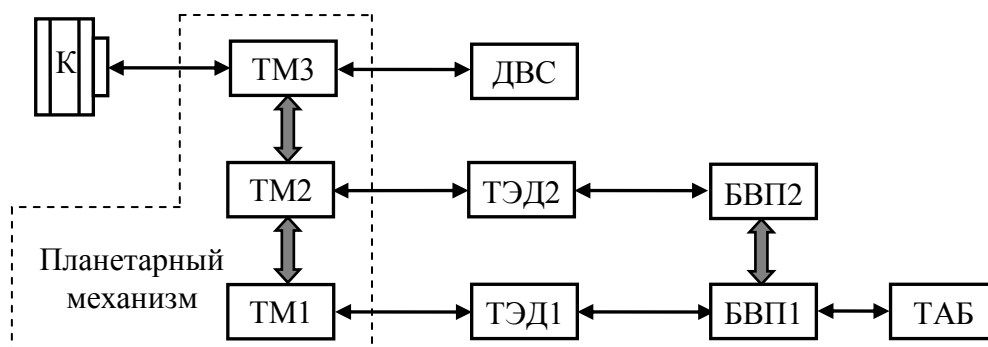


Рис. 1.14. СТП гибридного автомобиля параллельно-последовательного типа

Таким образом, путем гибридизации элементарных связей силовых элементов обобщенных СТП автомобиля можно построить многочисленные тяговые системы АТС с ТЭП. Очевидно, что идеальным видом экологически чистого автомобиля является электромобиль с одним источником электроэнергии на своем борту. Все рациональные структуры СТП АТС с КЭУ являются промежуточными вариантами для частичного решения проблем повышения энергетической и экологической эффективности автомобиля.

Проведенный анализ структур СТП современных и перспективных АТС с ТЭП позволяет отметить, что у каждой из них свои преимущества и недостатки. Последовательная схема гибридных автомобилей имеет наихудшие энергетические показатели из-за многократного преобразования энергии, однако, ее конструкция простая, в данной схеме легче организовать оптимальные рабочие режимы ДВС. Из-за жесткой связи с ведущими колесами ДВС в параллельной структуре должен работать в широком диапазоне частот, что повлияет на содержание вредных веществ в отработавших газах. Параллельно-последовательная схема имеет наилучшую энергетическую эффективность, но ее конструкция сложна. В настоящее время каждая структура имеет право на существование.

Можно отметить, что западные фирмы часто используют сложные многоступенчатые редукторы и механические передачи.

1.1.3. Система управления тяговым приводом АТС

СТП АТС с ТЭП представляет собой сложную динамическую систему, состоящую из ряда взаимосвязанных между собой подсистем. Для обеспечения эффективного функционирования СТП требуется создание рациональных стратегий управления, т.е. заложенных в системе управления (СУ) СТП алгоритмов, обеспечивающих автономную работу отдельных подсистем и их согласованную работу, с учетом всевозможных ограничений на управление и ресурсы силовых агрегатов. СУ СТП получает команды от водителя и в соответствии с сигналами обратной связи от всех силовых агрегатов принимает решение на применение надлежащих воздействий на них.

Сложность СУ СТП зависит от структуры последней. СУ СТП электромобилей подробно разработаны и изложены в теории электромобиля [123].

Автоматическое управление СТП гибридных автомобилей является сложным процессом, поскольку должны быть учтены все взаимосвязи между силовыми агрегатами АТС: ТЭД, ТАБ, ДВС, сцеплением, коробкой переключения передач и т.д., причем в различных фазах движения автомобиля (разгон, движение с равномерной скоростью, торможение и т.д.) при ограниченном числе органов управления автомобилем.

Проведенный анализ научно-исследовательских трудов, а также публикуемых патентов по СТП различных типов ГСУ [12, 71, 89...92, 221...230], позволяет представить обобщенную функциональную схему СУ ГСУ в двухуровневом виде, приведенную на рис. 1.15.

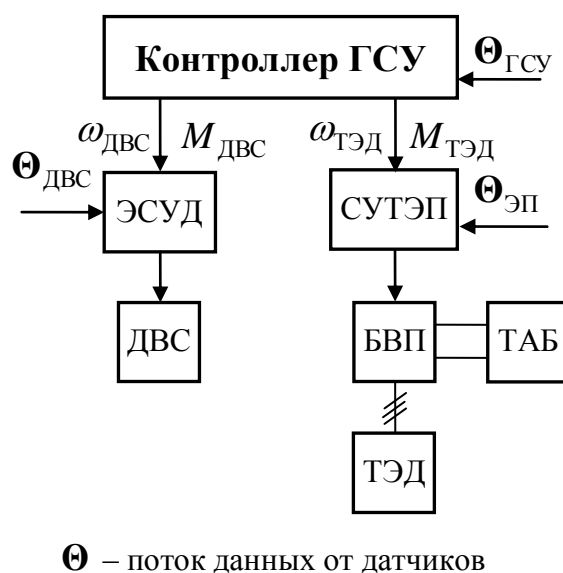


Рис. 1.15. Обобщенная функциональная схема системы управления ГСУ

Верхним уровнем СУ ГСУ является контроллер ГСУ, а нижними – электронная система управления ДВС (ЭСУД) и СУ ТЭП. Для автомобилей, оборудованных автоматическими КПП, предусмотрены соответствующие контроллеры. Если в состав ГСУ входят несколько ТЭД, то каждый такой ТЭД может иметь индивидуальный бортовой вентильный преобразователь (БВП) со своей соответствующей системой управления.

Контроллер ГСУ, на основании потока информации $\Theta_{\text{ГСУ}}$, полученного от датчиков, выполняет основные функции:

- определение режимов работы СТП автомобиля: режима чистой электрической тяги, гибридного режима (совместная работа ДВС и ТЭД), тормозных режимов (рекуперативного торможения, механического торможения или их комбинации);
- перераспределение потоков мощности между ДВС и ТЭД в зависимости от режима движения автомобиля, ресурса ТАБ по току и напряжению, допустимых условиях по перегреву ТЭД, по безопасной работе полупроводниковых ключей БВП и т.д.

В поток данных $\Theta_{\text{ГСУ}}$ (рис. 1.15) входят следующие параметры и величины: воздействие со стороны водителя (положения педалей акселератора, тормоза, рычага КПП), состояние автомобиля и его силовых агрегатов (скорость автомобиля; частоты вращения ДВС, ТЭД; выходные напряжение и ток ТАБ; температура агрегатов и т.д.). Набор параметров потока данных $\Theta_{\text{ДВС}}$, необходимого для управления ДВС, зависит от конкретного типа ДВС и способа управления им.

В итоге на выходе контроллера ГСУ формируются оптимальные задающие значения частоты вращения, момента ДВС и ТЭД ($\omega_{\text{ДВС}}$, $\omega_{\text{ТЭД}}$, $M_{\text{ДВС}}$, $M_{\text{ТЭД}}$) для их систем управления. Здесь критериями оптимальности могут быть минимальный удельный расход топлива ДВС, минимальные выбросы вредных веществ, минимальные потери в СТП, или компромиссная совокупность этих показателей. Именно решение задачи оптимального управления силовыми агрегатами ГСУ оказывает решающее влияние на энергетические, экологические и ездовые качества гибридного автомобиля.

Существуют, в основном, два метода синтеза оптимальных стратегий управления ГСУ. Первый метод – эвристический, основан на логических правилах функционирования отдельных агрегатов ГСУ и их совместной работы; второй метод – поисковый, основан на использовании математических методов поиска оптимальных управлений, разработанных в теории автоматического управления,

для определения режимов работы ДВС, оптимальных по выбираемому критерию. Однако основой для определения рабочих режимов силовых агрегатов ГСУ является баланс мощности или баланс энергии в системе: требуемая тяговая мощность на колесах АТС P_K обеспечивается суммарной мощностью ДВС $P_{\text{ДВС}}$ и ТАБ P_a :

$$\frac{dW_K}{dt} = P_K = P_{\text{ДВС}}\eta_1 \pm P_a\eta_2, \quad (1.1)$$

с учетом ограничений, наложенных на ресурсы силовых агрегатов системы:

$$\begin{cases} I_a \leq I_{a \max}; U_{a \min} \leq U_a \leq U_{a \max}; \\ I_s \leq I_{s \max}; U_s \leq U_{s \max}; M_{\text{ТЭД}} \leq M_{\text{ТЭД}}^{\max}; \omega_{\text{ТЭД}} \leq \omega_{\text{ТЭД}}^{\max}, \end{cases} \quad (1.2)$$

где W_K – энергия, расходуемая на преодоление сопротивления движению АТС; η_1, η_2 – КПД передачи потоков мощности ДВС, ТАБ ведущим колесам; I, U, M, ω – величины силы тока, напряжения, момента, угловой частоты, соответственно; нижним индексом «a» обозначает величины ТАБ, «s» – ТЭД, индексами «min», «max» – минимальное и максимальное значения соответствующей величины. Знак «+» в (1.1) соответствует режиму разряда ТАБ, а «-» – заряда.

А при торможении тормозная мощность на колесах обеспечивается суммарной мощностью ТЭД и механических тормозных устройств при выполнении ограничений типа (1.2).

С точки зрения повышения топливной экономичности, желательно, чтобы рабочие режимы ДВС лежали в области многопараметровой характеристики с минимальным удельным расходом топлива. По многопараметровой характеристике можно определить оптимальные по топливной экономичности значения частоты вращения и момента ДВС в функции мощности. Эти зависимости можно использовать для управления потоком мощности ДВС.

1.2. Рациональные пути совершенствования ТЭП АТС

1.2.1. Основные требования к ТЭП АТС и пути их совершенствования

Развитие теории и практики производства автомобилей подтвердило их основные эксплуатационные свойства: тягово-скоростные и тормозные свойства, топливная экономичность, экологическая безопасность, управляемость, устойчивость движения, маневренность, проходимость, плавность хода, надежность. В автомобильной промышленности непрерывно идет процесс повышения качества автомобиля. В современных автомобилях данные свойства обеспечивает сложная совокупность силовых агрегатов и вспомогательных оборудования, включая их системы управления. Эксплуатационные свойства классического автомобиля тесно связаны с процессом управления моментом и скоростью ДВС.

Следует отметить, что механические и энергетические характеристики ТЭД, которые подлежат управлению, напрямую влияют на эксплуатационные качества АТС. Для улучшения тягово-скоростных, тормозных свойств, проходимости, маневренности автомобиля ТЭД должны, при необходимости, развивать свои предельные значения момента и мощности во всех рабочих режимах с учетом существующих ограничений на его ресурсы, а также ресурсы связанных с ними других агрегатов. Улучшение плавности хода возможно путем демпфирования электроприводом (ЭП) динамических нагрузок в трансмиссии. Высокие динамичность и точность регулирования момента ТЭД позволяют повысить управляемость и устойчивость движения автомобиля.

В гибридных автомобилях механическими характеристиками ТЭД можно управлять с более высокой точностью и быстродействием, чем ДВС. Это значит, все «пиковые» нагрузки ДВС можно демпфировать электроприводом при достаточной мощности последнего, что позволяет «косвенным путем» но более эффективно управлять моментом и скоростью ДВС, и в конечном итоге, снизить расходы топлива и токсичные выбросы.

Таким образом, имеется возможность улучшения эксплуатационных свойств АТС повышением технико-эксплуатационных показателей ТЭП.

К технико-экономическим и эксплуатационным показателям ТЭП, как любого электропривода, предъявляют основные требования: низкая стоимость, высокие энергетические, массогабаритные показатели и надежность. Однако ТЭП АТС присущи свои специфики, отличающиеся от ЭП промышленного применения и ТЭП других типов электротранспорта.

ТЭП АТС постоянно функционируют в «старт-стоп» режимах в режимах с высоким темпом ускорения, замедления, широкими диапазонами изменения момента, скорости, с тяжелыми рабочими условиями (высокой температурой в моторном отсеке, неблагоприятными погодными условиями, большой и постоянной вибрацией и т.д.) при питании от источников энергии с ограниченной энергоемкостью и мощностью. В то же время промышленные ЭП оптимизированы для номинальных рабочих режимов, установлены в стационарных местах, где меньше влияние окружающей среды. Темпы ускорения ТЭП электропоезда и общественного электротранспорта обычно ограничены для обеспечения комфортабельности пассажиров. Источником питания этих электроприводов является электрическая сеть с теоретически бесконечной мощностью и энергоемкостью.

Таким образом, можно отнести ТЭП АТС к отдельному классу, отличающему от других типов ЭП следующими основными требованиями:

- высокими тягово-динамическими качествами, которые характеризуются большой перегрузочной способностью ТЭД, широким диапазоном скорости, в котором ТЭД может развивать максимальную мощность, высокими динамическими показателями по быстродействию, точности системы управления моментом. Первые качества ТЭД, в свою очередь, можно охарактеризовать величинами кратности момента $K_M = M_{\max} / M_{\min}$ (отношения максимального электромагнитного момента M_{\max} к минимальному моменту M_{\min} , развиваемому при максимальной скорости) и кратности скорости $K_\omega = \omega_{\max} / \omega_0$ (отношения максимальной угловой частоты вращения ТЭД ω_{\max} к базовой ω_0 – частоте, при которой мощность ТЭД начинает достигать максимального значения). ТЭП электромобилей и гибридных автомобилей последовательной структуры обычно требуют больших значений

K_M, K_ω ($\approx 4...5$) для обеспечения необходимой динамики АТС, способности преодоления больших подъемов, требуемой скорости движения АТС на автомагистралях при применении одно- или малоступенчатой передачи в СТП. В гибридных автомобилях параллельной структуры эти требования могут быть ниже, поскольку движение автомобиля при высоких скоростях может обеспечить ДВС;

- ТЭП АТС должны быть спроектированы с высокими энергетическими показателями в широких диапазонах изменения мощности для повышения массогабаритных показателей СТП, увеличения запаса хода АТС в режимах электрической тяги, что в конечном итоге позволяет улучшить топливную экономичность и экологическую безопасность автомобиля.

- высокими надежностями из-за тяжелых рабочих условий.

В структуре ТЭП АТС принципиально выделение двух взаимодействующих каналов – силового и информационно-управляющего. Силовой канал, предназначенный для преобразования энергии первичного источника в механическую, как правило, содержит энергоустановку, вентильный преобразователь, ТЭД, механическую трансмиссию. Информационно-управляющий канал, содержащий микропроцессорные средства управления и систему датчиков, предназначен для управления потоком энергии, а также сбора и обработки сведений о состоянии и функционировании системы, диагностики ее неисправностей.

С возрастающей популярностью АТС с ТЭП удешевляются их элементные базы, причем стоимость микропроцессорных средств управления снижаются более динамично по сравнению с силовыми агрегатами. Кроме того, жесткая конкуренция на мировом рынке электроники заставляет производителей микропроцессорных контролеров выпускать продукцию с большими, порой избыточными функциональными возможностями. Отсюда видны резервы, которые позволяют, без существенных материальных затрат, дальнейшему повышению технико-эксплуатационных показателей ТЭП путем совершенствования их методов управления при максимальном использовании заложенных в электронные средства управления возможностей.

Для повышения технико-эксплуатационных свойств городских АТС с ТЭП следует совершенствовать ТЭП по следующим путям:

- применить ТЭД и их источники электропитания с высокими энергетическими, динамическими характеристиками и надежностью;
- построить высококачественные системы управления (СУ) ТЭП, удовлетворяющие требованиям: высоким быстродействию и точности регулирования момента; предельной эксплуатации привода по моменту, мощности во всем диапазоне изменения скорости при высокой энергетической эффективности и надежности.

1.2.2. Состояние и перспективы развития элементов ТЭП АТС

Система «тяговый электродвигатель – вентильный преобразователь»

Требуемые тягово-динамические характеристики АТС способны обеспечить как ТЭП постоянного, так и переменного тока. Однако в настоящее время на АТС ТЭП переменного тока фактически вытеснили ТЭП постоянного тока. Это обусловлено достижениями в области силовой электроники и микропроцессорной техники, которые позволяют создавать высококачественные бесконтактные ТЭП на основе трехфазного АД с короткозамкнутым ротором и синхронного двигателя с возбуждением от высокоэффективных редкоземельных постоянных магнитов.

Фактически во всех модификациях гибридных автомобилях, разработанных японскими фирмами (Toyota, Honda, Nissan и т.д.) применяются синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ), обладающие высокими удельными энергетическими и массогабаритными показателями, высокой надежностью, большим рабочим ресурсом.

В зависимости от конструктивных особенностей различают два основных вида СДПМ:

- бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ), в которых геометрическое расположение витков обмотки якоря на статоре и постоянных магнитов на роторе обуславливает фазные ЭДС вращения трапецеидальной формы;
- бесконтактные двигатели переменного тока, фазные ЭДС которых имеют синусоидальный характер.

СДПМ с синусоидальной формой ЭДС вращения превосходят БДПТ по массогабаритным, энергетическим показателям, поэтому широко используются на образцах западных ЭМ, гибридных автомобилей, ЭМ с ТЭ.

На АТС применены два типа СДПМ – с неявнополюсным и явнополюсным ротором, причем последний в последнее время получает широкое применение, благодаря более высоким значениям момента и КПД из-за целенаправленного комбинирования активной и реактивной составляющих момента. Эволюция применения СДПМ свидетельствуется в выпускаемых фирмой Toyota образцах ЭМ (Toyota RAV4-EV) и гибридного автомобиля (Toyota Prius). По сообщению специалистов фирмы Toyota КПД СДПМ, установленного на своих гибридных автомобилях достигает 96%, удельная мощность около 4 кВт/кг, удельный момент 10 Нм/кг. Однако стоимость ТЭП на базе СДПМ выше асинхронного ТЭП (АТЭП) примерно на 20%...40% в зависимости от номинальной мощности.

Преимущества АТД заключаются в простоте конструкции, высокой надежности, приемлемой стоимости, развитой технологии производства, малых затрат на обслуживание. АТЭП характеризуется наилучшим соотношением цена/качество. Примером применения АТЭП на АТС является экспериментальный образец автомобиля с ГСУ на базе УАЗ-3153, разработанный учеными, специалистами МГТУ «МАМИ» и НПП «Квант».

В настоящее время фактически во всех СТП гибридных автомобилей и ЭМ, разработанных различными автомобилестроителями, применяется структура системы трехфазного ТЭП переменного тока, приведенная на рис. 1.16. В качестве автономного инвертора напряжения (АИН) обычно используется трехфазная мостовая схема. Применяются также схемы многоуровневого инвертора или параллельного соединения инверторов в ТЭП гибридных грузовых автомобилей. В качестве силовых полупроводниковых ключей общепризнанны биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

Обычно при согласованных уровнях напряжения ЭУ (например, ТАБ с ДВС – генератор) и ТЭД преобразователь постоянного тока (ППТ) отсутствует. В ГСУ

THS-II (Toyota Hybrid System) фирмы Toyota применена традиционная схема импульсного ППТ повышающего типа (рис. 1.17) для повышения напряжения ТАБ с 274В на 500В. Существует большое количество схмотехнических решений построения ППТ, однако, наиболее распространенной схемой по-прежнему остается схема на рис. 1.17, благодаря своей простоте, надежности и высокому значению КПД.



Рис. 1.16. Структура системы тягового электропривода АТС

Многие фирмы применяют интегрированные узлы, объединяющие двигатели, преобразователи, механические передачи, встроенные тормозные системы и системы охлаждения, силовые и электронные управляющие устройства — мехатронные модули движения. Специалисты видят в них перспективу и основное средство удешевления приводных систем, повышения их показателей.

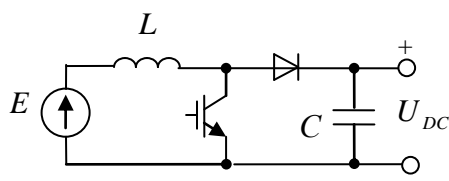


Рис. 1.17. ППТ повышающего типа

В последнее время интенсивно ведутся исследования по применению вентильно-индукторной машины (ВИМ) в качестве ТЭД ЭМ и стартер-генератора. Преимущества ВИМ: простая и дешевая конструкция из-за отсутствия обмотки ротора и постоянного магнита; малая инерция ротора и высокое соотношение момента/инерции; фазы статора можно управлять отдельно, повреждение одной из фаз статора не предотвращает действие привода. Основные недостатки ВИМ: высокая пульсация вращающего момента; более высокий акустический уровень шума, чем у других двигателей.

На основании анализа современной элементной базы ТЭП можно отметить перспективы применения электроприводов переменного тока на базе АД, СДПМ и вентильно-индукторного привода.

Состояние и тенденции развития источников энергии ТЭП АТС

Накопленные к настоящему времени результаты исследований по внедрению альтернативных источников энергии, проведенных мировыми автомобилестроительными фирмами и фирмами-разработчиками энергоустановок, позволяют определить, помимо ДВС, основные источники/накопители электроэнергии, пригодные для применения на автомобиле: электрохимические генераторы, аккумуляторные батареи и емкостные накопители энергии (суперконденсаторы). Разработки автостроителей идут именно по созданию и совершенствованию различных видов гибридных автомобилей, электромобилей с ТАБ на основе литиевых анодов, электромобилей с ЭХГ, питаемыми водородом, бензином, метанолом и т.д. Современные ЭХГ и ТАБ имеют технические показатели (энергоемкость, мощность), достаточные для применения в городских условиях (ЭМ с ТАБ) или в дальних поездках (ЭМ с ЭХГ), однако, как они еще дорогие; также требуется огромное капиталовложение для создания инфраструктуры их обслуживания и «заправки». Будущее автомобилестроения, по мнению ведущих автостроителей, состоит в создании экологически чистых электромобилей, а гибридный автомобиль, «переходный» вариант между традиционным автомобилем с ДВС и ЭМ, является единственным типом АТС, который сегодня и в ближайшей перспективе позволяет решить проблемы снижения расходов топлива и токсичных выбросов ДВС.

Технико-экономические показатели современных ЭХГ, ТАБ, ЕНЭ, а также их перспективы развития известны в различных источниках литературы, а также в Интернете, поэтому в работе не анализированы. Ниже приводим анализ возможности применения солнечной энергии на борту АТС.

Ежегодно солнце посылает к Земле около $1,1 \times 10^{18}$ кВт.ч лучистой энергии. Без экологического ущерба возможно использовать 1,5% этой энергии, т.е. $1,6 \cdot 10^{16}$ кВт.ч в год, это эквивалентно $2 \cdot 10^{12}$ тонн условного топлива. В табл. 1.1 приведено среднемесячное дневное поступление суммарной солнечной энергии на поверхность земли в день. Из данных табл. 1.1 видно, что среднегодовая суммарная солнечная энергия $W_{\text{солн}}$, поступающая на 1 м^2 поверхности земли в день для стран, находящихся у экватора, достигает 6 кВт.ч (21,4 МДж).

Таблица 1.1

**Среднемесячное дневное поступление суммарной солнечной энергии
на поверхность земли в день, МДж/м²**

Широта, ⁰ Месяц	0 ⁰	10 ⁰	20 ⁰	30 ⁰	40 ⁰	50 ⁰	60 ⁰	70 ⁰	80 ⁰	90 ⁰
Январь	20,9	17,3	13,3	9	4,7	1,8	-	-	-	-
Февраль	22	19,1	15,5	11,5	7,2	3,6	0,7	-	-	-
Март	23	21,6	19,1	15,8	12,2	7,9	4	1,1	-	-
Апрель	22,7	22,7	22	20,2	17,6	14	10,1	6,1	2,1	0,4
Май	21,2	22,7	23,4	23	22	19,8	16,6	13	10,4	8,3
Июнь	19,8	22,3	23,8	24,5	24,5	22,7	21,6	19,1	18	17,6
Июль	19,4	22	23,8	24,5	24,5	22,7	21,6	19,1	18	17,6
Август	20,5	22,3	22,7	23,4	22,3	20,5	18	14,4	11,5	10,8
Сентябрь	22	22,7	22,3	20,9	18,4	15,5	11,5	7,6	3,6	1,4
Октябрь	22,7	21,6	19,8	16,9	13,3	9,4	5,4	1,8	-	-
Ноябрь	22	19,4	16,2	12,6	8,3	4,3	1,4	-	-	-
Декабрь	20,9	17,6	13,7	9,4	5,4	1,8	-	-	-	-
Средне- годовой	21,4	20,9	19,6	17,6	14	11,9	9,2	6,8	5,2	4,6

Как известно, приведенный расход энергии $w_{y\partial}$ за городской цикл движения электромобилей находится в пределе 80...100 Вт.ч/(т.км) [75, 142]. В табл. 1.2 представлены расчетные пробеги АТС массами 1...3 т, оборудованных СБ площадью 5 м², КПД 15% (реальное значение КПД современных СБ) при условиях освещения в странах, находящихся от экватора до 50⁰ широты. Большие значения пробега рассчитаны при $w_{y\partial} = 80$ Вт.ч/(т.км) и меньшие значения – $w_{y\partial} = 100$. При известных значениях W_c (Вт.ч), площади S_{CB} (м²) и КПД η_{CB} (%) СБ, удельного расхода энергии за цикл $w_{y\partial}$ (Вт.ч/(т.км)), массы электромобиля m (т), его пробег L (км) определяется как:

$$L = \frac{W_c S_{CB} \eta_{CB}}{w_{y\partial} m}.$$

Таблица 1.2

**Расчетный пробег АТС с СБ площадью 5 м², КПД 15% при условиях
освещения в странах, находящихся от экватора до 50⁰ широты, км**

Широта, ⁰ Масса, т	0 ⁰	10 ⁰	20 ⁰	30 ⁰	40 ⁰	50 ⁰
1	44,6...55,7	43,5...54,4	40,8...51	36,7...45,8	29,2...36,5	24,8...31
1,5	29,7...37,2	29,0...36,3	27,2...34	24,4...30,6	19,4...24,3	16,5...20,7
2	22,3...27,9	21,8...27,2	20,4...25,5	18,3...22,9	14,6...18,2	12,4...15,5
3	14,9...18,6	14,5...18,1	13,6...17	12,2...15,3	9,7...12,2	8,3...10,3

Данные, полученные в табл. 1.2, подтверждают возможность применения СБ в качестве дополнительного источника энергии на городских АТС с ТЭП в странах, находящихся от экватора до широты 40^0 . Работая совместно с ТАБ, СБ позволяет увеличить срок службы первой и повысить длину пробега автомобиля без ее перезаряда. Опытные особо легкие гоночные солнцемобили с КЭУ, состоящей из ТАБ и СБ, продемонстрировали пробег в день 150...200 км при максимальной скорости порядка 150 км/ч.

Удельная масса современных СБ составляет $5...10 \text{ кг/м}^2$, причем около 40% массы приходится на полупроводниковые элементы, а остальное – на конструкцию. Ожидается, что использование сверхлегких композитных материалов позволит уменьшить массу конструкции, что даст возможность снизить удельную массу СБ до $1,5 \text{ кг/м}^2$. Преимущество СБ обусловлено их высокой надежностью, большим сроком службы (около 30 лет), малой массой, простотой обслуживания, эффективным использованием как прямой, так и рассеянной солнечной радиации.

В табл. 1.3 приведены достигнутые величины КПД основных видов СЭ, пригодных для целей наземного использования. Анализ технических характеристик СЭ различных типов показывает, что в настоящее время пригодным для использования на АТС являются элементы на основе монокристаллического кремния и аморфного кремния.

Сегодня применение солнечной энергии на автомобиле не является иллюзией. В 2008г. продемонстрировала компания Fisker (США) свой концептуальный гибридный автомобиль «Karma» с литиевой ТАБ и монтированной на крыше солнечной батареи (СБ) на основе солнечных элементов (СЭ) для подзаряда первой. Также в 2008г. фирмой Toyota представлен концептуальный автомобиль с 250Вт СБ «Solar Toyota Prius», который в солнечный день потребляет около 3 литра бензина за счет дополнительного использования солнечной энергии. Благодаря оборудованной СБ данный автомобиль способен преодолеть около 32 км в сутки исключительно лишь на электрической тяге.

Таблица 1.3

КПД солнечных элементов и их модулей

Параметры СЭ			КПД (%)	Площадь (см ²)	$U_{xx}^{(1)}$ (В)	$I_{кз}^{(2)}$ (mA)	$FF^{(3)}$ (%)
Материал и структура СЭ							
Кремниевые	Монокристал- лический	Элемент	24.4 ± 0.5	4.00	0.696	42.0	83.6
		Элемент (с концентратором)	26.8 ± 0.8	1.60	-	-	
		Модуль	22.7 ± 0.6	778	5.600	3934	80.3
	Поликристал- лический	Элемент	19.8 ± 0.5	1.09	0.654	38.1	79.5
		Модуль	15.3 ± 0.4	1017	14.60	1360	78.6
	Аморфный	Элемент	12.7 ± 0.4	1.0	0.887	19.4	74.1
		Модуль (a-Si/a-SiGe/ a-SiGe)	10.2 ± 0.5	903	2.32	6470	61.2
	Тонкие	Элемент	16.6 ± 0.5	0.98	0.608	33.5	81.5
Поликри- сталлический пленочный	Теллурид кад- мия (CdTe)	Элемент	16.0 ± 0.2	1.0	0.840	26.1	73.1
		Модуль	9.2 ± 0.5	3366	45.59	1100	62.1
	CuInGaSe ₂ (CIS)	Элемент	16.4 ± 0.5	1.025	0.678	32.0	75.8
		Модуль	11.1 ± 0.6	3665	26.01	2320	67.4
Элементы на основе соеди- нения III-V групп	GaAs (монокристаллический)		25.1 ± 0.8	3.91	1.022	28.2	87.1
	GaAs (пленочный)		23.3 ± 0.5	4.00	1.011	27.6	83.8
	GaAs (поликристаллический)		18.2 ± 0.5	4.011	0.994	23.0	79.7
	InP (монокристаллический)		21.9 ± 0.7	4.02	0.878	29.3	85.4
	InP (монокристаллический, с кон- центратором)		24.3 ± 1.2	0.075	-	-	-
Элементы на основе гетеро- пере-хода	GaAs/ GaInP		30.3 ± 0.5	4.0	2.488	14.22	85.6
	GaAs/ GaInP (с концентратором)		30.2 ± 1.5	0.053	-	-	-
	GaAs/CIS (пленочный)		25.8 ± 1.3	4.00	-	-	-
	a-Si/CIGS (пленочный)		14.6 ± 0.7	2.40	-	-	-
	a-Si/a-Si/a-SiGe		13.5 ± 0.7	0.27	2.375	7.72	74.4

(1) – напряжение холостого хода; (2) – ток короткого замыкания;

(3) – коэффициент заполнения вольтамперной характеристики СЭ.

1.2.3. Критерии оптимизации ТЭП АТС

В соответствии с вышеотмеченными требованиями к ТЭП АТС основными критериями, рассматриваемыми в диссертации, являются динамические критерии оптимальности по быстродействию, точности регулирования момента и энергетические критерия оптимальности по минимуму потерь, максимальной перегрузочной способности ТЭП при действующих в нем ограничениях по магнитному потоку ТЭД, токам и напряжениям всех силовых агрегатов электропривода.

В связи с требованием регулирования момента и скорости в широких пределах, в ТЭП обычно применяются системы подчиненного регулирования координат, где внешним контуром регулируется скорость, а внутренними контурами – момент (токи) и магнитные потоки. Такое построение системы управления обусловлено тем, что длительности переходных электромагнитных процессов в ТЭД несоизмеримо малы по сравнению с длительностью переходных процессов изменения скорости АТС. Поэтому независимо от вида движения АТС можно считать, что ТЭД в электромагнитном отношении находится в статическом (установившемся) режиме. Последнее обстоятельство позволяет формировать заданные значения потокосцеплений, токов для внутренних контуров, исходя из статических зависимостей ТЭП по желаемым критериям оптимальности. Управление ТЭП по какому-либо критерию оптимизации всегда возможно из-за присутствия в электродвигателях переменной (или переменных) состояния, которую можно варьировать для достижения поставленной цели.

В настоящее время в теории электропривода, а также на производственной практике, выделены основные законы оптимального управления ЭП, позволяющие повысить их энергетическую эффективность: минимума тока статора, суммарных потерь в электродвигателе (ЭД), в ЭП; максимума КПД, коэффициента мощности $\cos \varphi$, момента, механической мощности ЭД, максимума КПД ЭП. К асинхронному ЭП можно добавить закон М.П. Костенко $U / f \equiv \sqrt{M}$ (постоянства потерь в роторе), законы поддержания постоянства магнитных потокосцеплений, минимума потерь в меди АД.

Несмотря на широкий выбор вышеотмеченных критериев оптимизации, в теории тягового электропривода подтверждена нерациональность использования какого-либо одного закона оптимального управления. Обеспечение высоких энергетических показателей ТЭП возможно только при рациональном сочетании законов управления ими, а выбор нужного сочетания необходимо уточнить в процессе проектирования СТП АТС [123]. Возникает естественное желание более глубоко изучить эти сочетания в теоретическом плане и выработать более конкретные рекомендации применения оптимальных критериев для управления ТЭП.

Согласно общепринятому положению, принятому в теории электропривода [46], для оценки энергетической эффективности работы ТЭП можно использовать величину КПД электропривода $\eta_{\text{ТЭП}}$, которая определяется как соотношение между мощностью $P_{\text{ЭУ}}$, расходуемой энергоустановкой для питания ТЭП, и тяговой мощностью $P_{\text{К}}$, реализуемой на колесах АТС:

$$\eta_{\text{ТЭП}} = P_{\text{К}} / P_{\text{ЭУ}}. \quad (1.3)$$

При торможении АТС генератором, КПД ТЭП определяется выражением:

$$\eta_{\text{ТЭП}} = |P_{\text{ЭУ}}| / |P_{\text{К}}|. \quad (1.4)$$

Из структуры ТЭП АТС, приведенной на рис. 1.16, имеем отношения:

- в двигательном режиме:

$$\begin{cases} P_{\text{ЭУ}} = P_{\text{К}} + \Delta P_{\text{ЭУ}} + \Delta P_{\text{АИН}} + \Delta P_{\text{ТЭД}} + \Delta P_{\text{ТР}}; \\ P_{\text{К}} = P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{ТР}}; \quad P_{\text{мех}} = M\omega; \end{cases} \quad (1.5)$$

- в генераторном режиме:

$$\begin{cases} |P_{\text{К}}| = |P_{\text{ЭУ}}| + \Delta P_{\text{ЭУ}} + \Delta P_{\text{АИН}} + \Delta P_{\text{ТЭД}} + \Delta P_{\text{ТР}}; \\ |P_{\text{К}}| = |P_{\text{мех}}| + \Delta P_{\text{ТР}}; \quad |P_{\text{мех}}| = |M|\omega, \end{cases} \quad (1.5)$$

где $P_{\text{мех}}$, M , ω – механические мощность, электромагнитный момент, развиваемые ТЭД, и его частота вращения ротора; $\Delta P_{\text{ЭУ}}$, $\Delta P_{\text{АИН}}$, $\Delta P_{\text{ТЭД}}$, $\Delta P_{\text{ТР}}$ – потери мощности в ЭУ, АИН, ТЭД и трансмиссии, соответственно; в двигательном режиме величины момента, мощности принимаются положительными значениями; а в генераторном режиме – отрицательными.

Из (1.3)...(1.5) можем записать выражения КПД ТЭП:

- в двигательном режиме:
$$\eta_{\text{ТЭП}} = \frac{P_{\text{К}}}{P_{\text{ЭУ}}} = \frac{P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{ТР}}}{P_{\text{мех}} + \Delta P_{\Sigma} - \Delta P_{\text{ТР}}}; \quad (1.6)$$

- в генераторном режиме:
$$\eta_{\text{ТЭП}} = \frac{|P_{\text{ЭУ}}|}{|P_{\text{К}}|} = \frac{|P_{\text{мех}}| - \Delta P_{\Sigma} + \Delta P_{\text{ТР}}}{|P_{\text{мех}}| + \Delta P_{\text{ТР}}}, \quad (1.7)$$

где $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{ЭУ}} + \Delta P_{\text{АИН}} + \Delta P_{\text{ТЭД}} + \Delta P_{\text{ТР}}$ – суммарные потери мощности в ТЭП.

Принимая допущение о том, что темпы изменения частоты вращения ротора (ω) и потерь в трансмиссии ($\Delta P_{\text{ТР}}$) медленнее, чем темп изменения электромагнитного момента, можно считать, что в достаточно малом расчетном промежутке времени величина $\Delta P_{\text{ТР}}$ постоянны. В каждой заданной рабочей точке на плоскости механической характеристики ТЭД (M, ω) (т.е. при заданных значениях мощности на валу ТЭД $P_{\text{мех}}$), из (1.6) видно, что КПД ТЭП максимален, и расходуемая ЭУ мощность $P_{\text{ЭУ}}$ минимальна при минимуме величины ΔP_{Σ} .

В генераторном режиме из (1.7) можно заметить, что при минимуме потерь ΔP_{Σ} мощность $P_{\text{ЭУ}}$, полученная ЭУ, максимальна, а КПД ТЭП максимален.

В таком контексте задача управления ТЭП по минимуму потерь эквивалентна минимуму расходуемой мощности ЭУ, максимуму КПД ТЭП. Это позволяет снизить количество рассматриваемых критериев оптимальности ТЭП.

Как известно, ТЭП являются электроприводами, регулируемые вентилями преобразователями. Дискретная работа полупроводниковых вентилях создает, помимо основных потерь мощности, вызванных основными гармониками статорного напряжения и тока, модуляционные потери, обусловленные высокочастотными составляющими тока. В связи с этим можно описать величину суммарных потерь в ТЭП ΔP_{Σ} выражением:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma 1} + \sum_{\nu=2}^{\infty} \Delta P_{\Sigma \nu}, \quad (1.8)$$

где $\Delta P_{\Sigma 1}$ – суммарные потери мощности в ТЭП, вызванные основной гармоникой напряжения статора, $\Delta P_{\Sigma \nu}$ – ν -й гармоникой.

Следует отметить, что метод управления ТЭП определяют алгоритмы работы силовых ключей, и, следовательно, модуляционные потери в силовых агрегатах электропривода, в том числе и в автономных источниках энергии.

Для выяснения влияния метода управления на энергетическую эффективность ТЭП рассмотрим экспериментальные записи фазного статора тока асинхронного двигателя и выходного тока ТАБ в процессе разгона гибридного автомобиля УАЗ-3153 МГТУ «МАМИ», приведенные на рис. 1.18.

Структура АТЭП подобна структуре, представленной на рис. 1.16, в которой в качестве энергоустановки выступает ТАБ (без ППТ), ТЭД – трехфазный АД, управляемый частотно-токовым методом (т.е. регулируемые переменными являются амплитуда статорного тока и его частота). Трехфазное напряжение статора АД формируется способом синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) длительности импульсов управления силовых транзисторов, с выходом на 6-и ступенчатый режим переключения ключей ($\lambda = 180^\circ$) с целью обеспечения условия максимального использования напряжения ТАБ. Напомним, что в режиме управления $\lambda = 180^\circ$ амплитуда статорного напряжения (U_s) достигает максимального значения $U_{s\max} = (2/\pi)U_{\text{ТАБ}}$, где $U_{\text{ТАБ}}$ – выходное напряжение ТАБ.

На рисунке 1.18 видно, что после выхода АИН в режим работы с законом управления $\lambda = 180^\circ$ (такой режим характерен 6-и ступенчатой формой фазного тока статора, иллюстрированной на рис. 1.18, б) наблюдаются большие пульсации тока разряда ТАБ (рис. 1.18, а). Данное «негативное» явление можно объяснить двумя причинами:

- в данном режиме кривые выходного напряжения АИН имеют повышенный коэффициент гармонического искажения из-за прямоугольной ступенчатой формы фазного напряжения статора, которое может быть описано уравнением [46, 114, 144]:

$$u_{sA}(t) = \frac{2U_d}{\pi} \left(\sin \omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t + \frac{1}{7} \sin 7\omega_1 t + \frac{1}{11} \sin 11\omega_1 t + \dots \right),$$

т.е. амплитуда ν -й гармоники равна $1/\nu$ амплитуды 1-й (основной) гармоники;

- согласно методу частотно-токового управления, в системе управления АТЭП не предусмотрено регулирование магнитного потока двигателя, что приводит к его большим колебаниям и большим пульсациям тока статора, электромагнитного момента. Это в общем итоге вызывает ухудшение энергетических показателей электропривода в целом. Данное положение подтверждено в результате сравнительного анализа электромагнитных и энергетических характеристик АТЭП при различных методах управления, приведенного в главе 3 диссертационной работы.

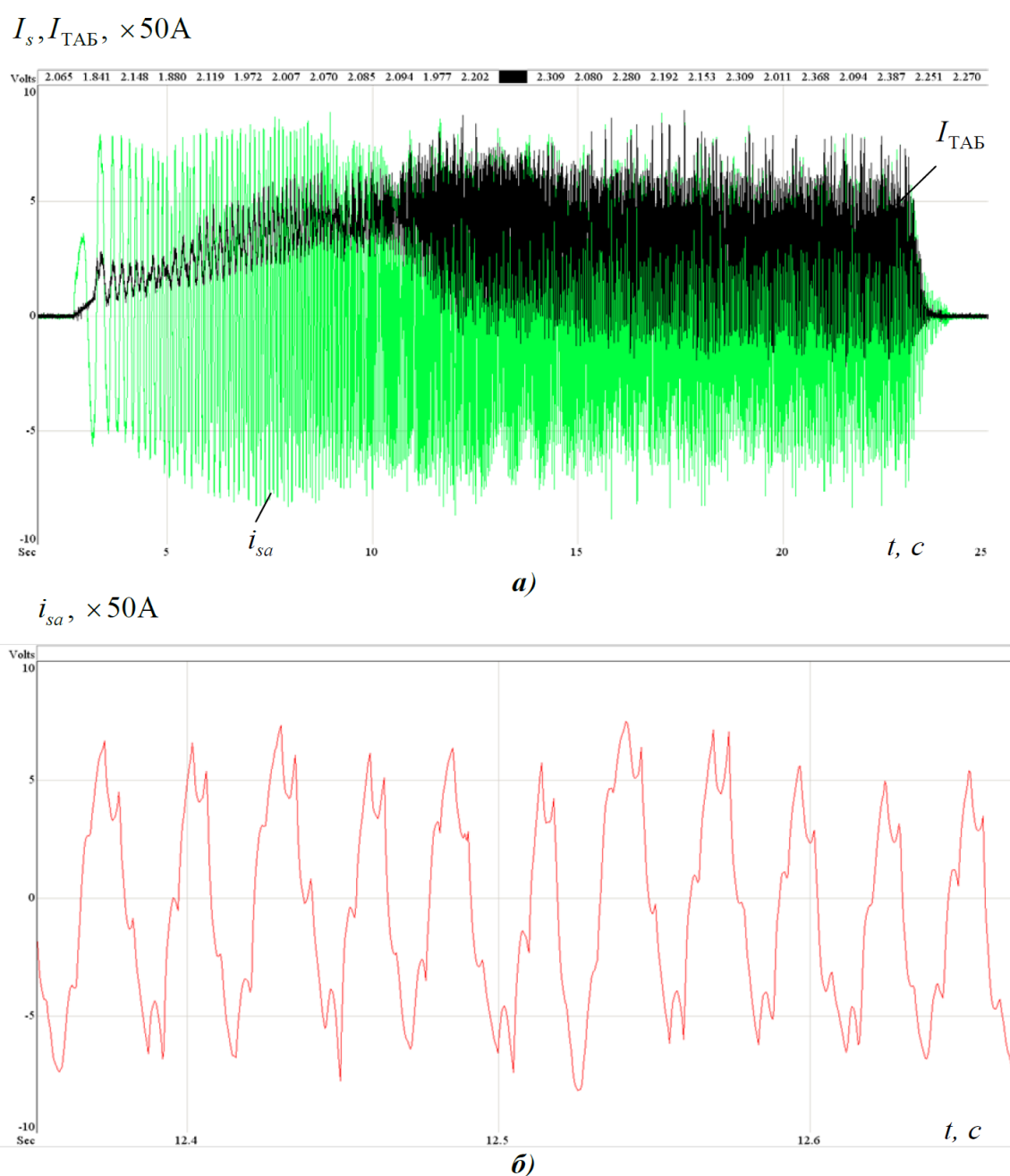


Рис. 1.18. Экспериментальные записи процесса разгона асинхронного ТЭП:
а) формы фазного тока статора (i_{sa}), тока разряда ТАБ ($I_{ТАБ}$);
б) фазного тока статора в 6-и ступенчатом режиме работы АИН ($\lambda = 180^\circ$)

Из (1.18) и вышеприведенного анализа зависимости составляющих модуляционных потерь в электроприводе от его способа управления, можно отметить, что обеспечение условия «минимума» суммарных потерь в ТЭП крайне сложно. Более корректен термин «квазиоптимум», т.е. «близко к оптимуму».

Данный анализ также позволяет определить целесообразность разделения решения задачи управления ТЭП по квазиоптимуму суммарных потерь на 2 этапа:

- определение закона управления, обеспечивающего квазиоптимальное условие минимума суммарных потерь в ТЭП, включающих основных и модуляционных потерь;
- отыскание метода управления ТЭП, обладающего наилучшей энергетической эффективностью.

При рациональных допущениях, в работе доказано, что квазиоптимальное условие минимума суммарных потерь в АТЭП является условием минимума основных потерь в АТД.

Поставленную в работе задачу совместного управления ТЭП по минимуму потерь и максимуму перегрузочной способности можно сформулировать как задачу минимизации суммарных потерь в ТЭП при предельном использовании ТЭД по моменту во всем диапазоне изменения его скорости, и при полном комплексе реально действующих в электроприводе ограничений по току, напряжению:

$$\min \Delta P_{\Sigma} \text{ при } \Omega \leq \Omega_{\max} \text{ и } M \leq M_{\max}(\omega), \quad (1.9)$$

где $\Omega, \Omega_{\max} = [U_{\Sigma\text{У}}^{\min}, U_{\Sigma\text{У}}^{\max}, U_{\text{АИН}}^{\max}, U_{\text{ТЭД}}^{\max}, I_{\Sigma\text{У}}^{\max}, I_{\text{АИН}}^{\max}, I_{\text{ТЭД}}^{\max}, \Phi_{\max}]^T$ – векторы напряжений, токов (U, I) силовых агрегатов ТЭП, магнитного потока (Φ) ТЭД и их допустимых значений; $M_{\max}(\omega)$ – предельная механическая характеристика ТЭД, обусловленная вышеприведенными ограничениями.

Решение задачи (1.9) возможно практически для всех типов машин, применяемых в тяговом электроприводе. Здесь необходимо учитывать собственные свойства того или иного типа электрической машины, т. е. определить оптимальные величины управляющих воздействий в зависимости от реализации требуемых выходных параметров.

1.3. Структуры ТЭП переменного тока

Проведенные в предыдущем разделе анализы требований к ТЭП АТС и зависимости его энергетической эффективности от способа управления требуют более детального исследования методов управления, позволяющих повысить технико-эксплуатационные показатели ТЭП переменного тока.

Отмеченные выше динамические критерии оптимальности по быстродействию и точности регулирования момента АД и СДПМ фактически могут быть обеспечены современными методами частотного управления электроприводом: векторным и методом прямого управления моментом (ПУМ), которые позволяют отдельно регулировать электромагнитный момент и магнитные потоки ЭД. Высокая энергетическая эффективность ЭП обеспечивается регулированием составляющих вектора тока статора или потокосцепления ротора ЭД.

Ниже приведены структуры классических систем векторного управления и ПУМ в качестве эталонов для сравнения с предложенными нами в дальнейшем системами управления (СУ) моментом ЭП переменного тока на базе АД и СДПМ.

1.3.1. Анализ современных систем управления ТЭП переменного тока

Системы векторного управления электроприводами переменного тока

Регулирование координат высококачественных ЭП переменного тока основано на принципе векторного управления, построенном с помощью математических моделей ЭД в различных системах координат, ориентированных по направлению какого-либо вектора переменных, формирующего электромагнитный момент. Предложенная в 1972г. Blaschke F. фирмы Siemens [153] система управления АД «Transvektor» открыла этап широкого внедрения векторных ЭП переменного тока на базе АД и СДПМ в различных областях техники и производства, в том числе и электрической тяги. Различными авторами разработаны способы управления АД в системах координат, ориентированных по векторам потокосцепления статора, главного потокосцепления, вектору тока статора, по ротору двигателя, в неподвижной системе координат и т.д.

В настоящее время векторный фактически стал одним из стандартных методов высококачественного управления частотно-регулируемым ЭП переменного тока. За счет регулирования амплитуд и углов смещения между векторами переменных состояния АД обеспечивается полное управление электроприводом, как в статических, так и в динамических режимах. Необходимость регулирования скорости и момента асинхронных ТЭП в широких пределах требует наличия в их СУ контура регулирования потокосцепления ротора для повышения динамичности привода в переходных процессах. Одна из возможных схем систем векторного управления трехфазного АТЭП по их минимуму потерь и максимуму перегрузочной способности представлена на рис. 1.19.

Схема, приведенная на рис. 1.19, основана на известной структуре системы векторного управления АД, ориентированной по полю ротора, с введением блока формирования задающих величин Ψ_R^*, i_{sq}^* по алгоритму управления АД по критериям минимума потерь и максимума перегрузочной способности, разработанному во главе 2. В систему возможно введение адаптивных идентификаторов параметров, наблюдателей переменных состояний АД, предложенных во главе 3 настоящей работы, для повышения технико-эксплуатационных качеств электропривода. Принцип работы и методики проектирования системы векторного управления АД известны в литературе.

На рис. 1.19 и далее приняты следующие обозначения:

u, i, U, I – мгновенные значения и модули векторов напряжения, тока; индексы « s, r, m » соответствуют величинам статора, ротора и контура намагничивания;

$\Psi_R, \theta_{\Psi R}$ – модуль вектора потокосцепления и его угол положения в неподвижной системе координат, связанной со статором;

U_d – входное (постоянное) напряжение АИН;

$ABC, \alpha\beta, dq$ – обозначения систем координат, приведенные в списке основных обозначений величин;

переменные, отмеченные верхней звездочкой «*», обозначают задающие величины для СУ ЭП, знаком «^» – оцениваемые по модели электродвигателя.

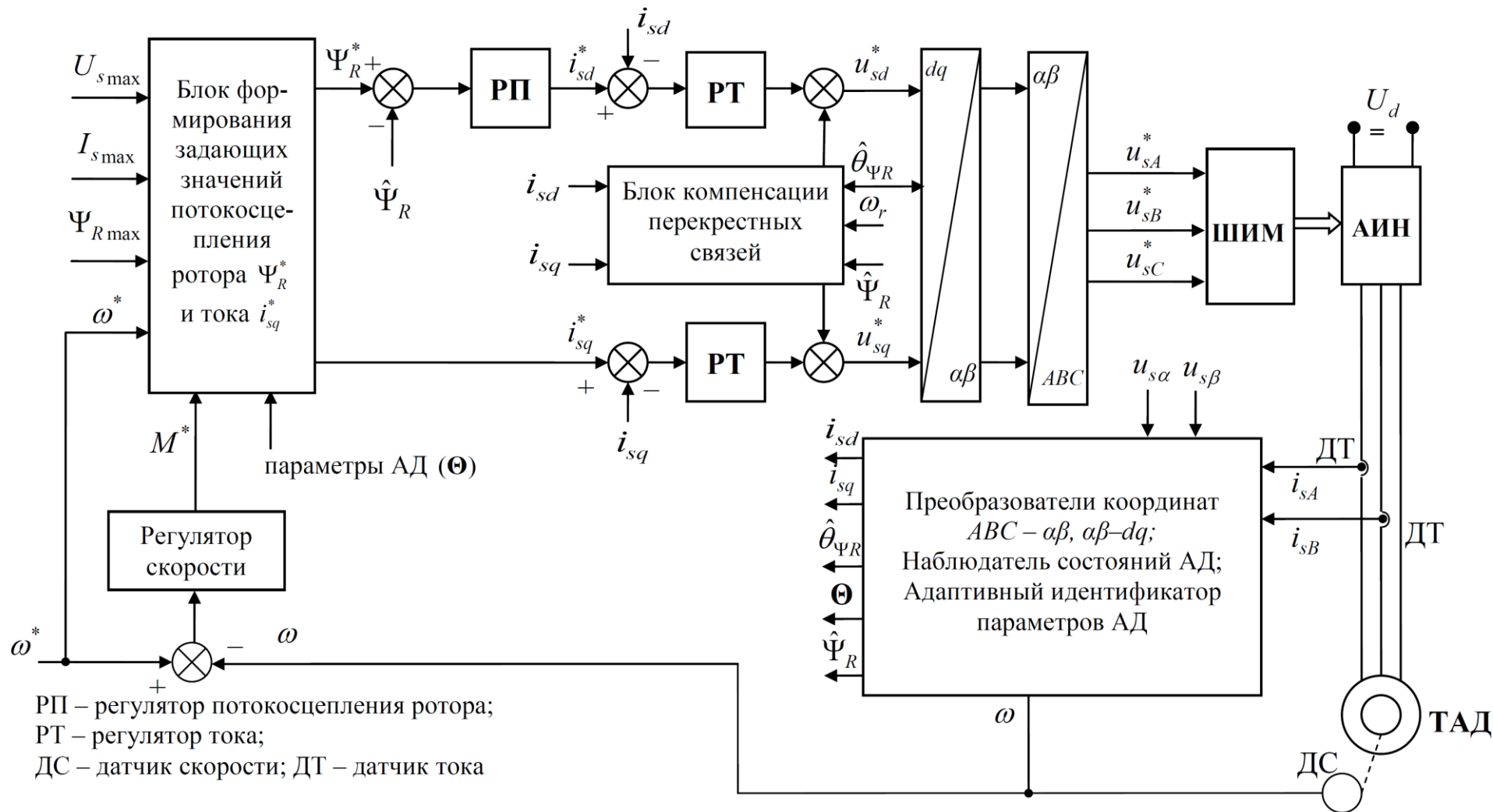


Рис. 1.19. Функциональная схема системы векторного управления асинхронным тяговым электроприводом по критериям минимума потерь и максимума перегрузочной способности

На рис. 1.20 приведена функциональная схема системы векторного управления трехфазного СДПМ с регулированием фазных токов статора [81], принцип построения которой не отличается от СУ асинхронного ЭП.

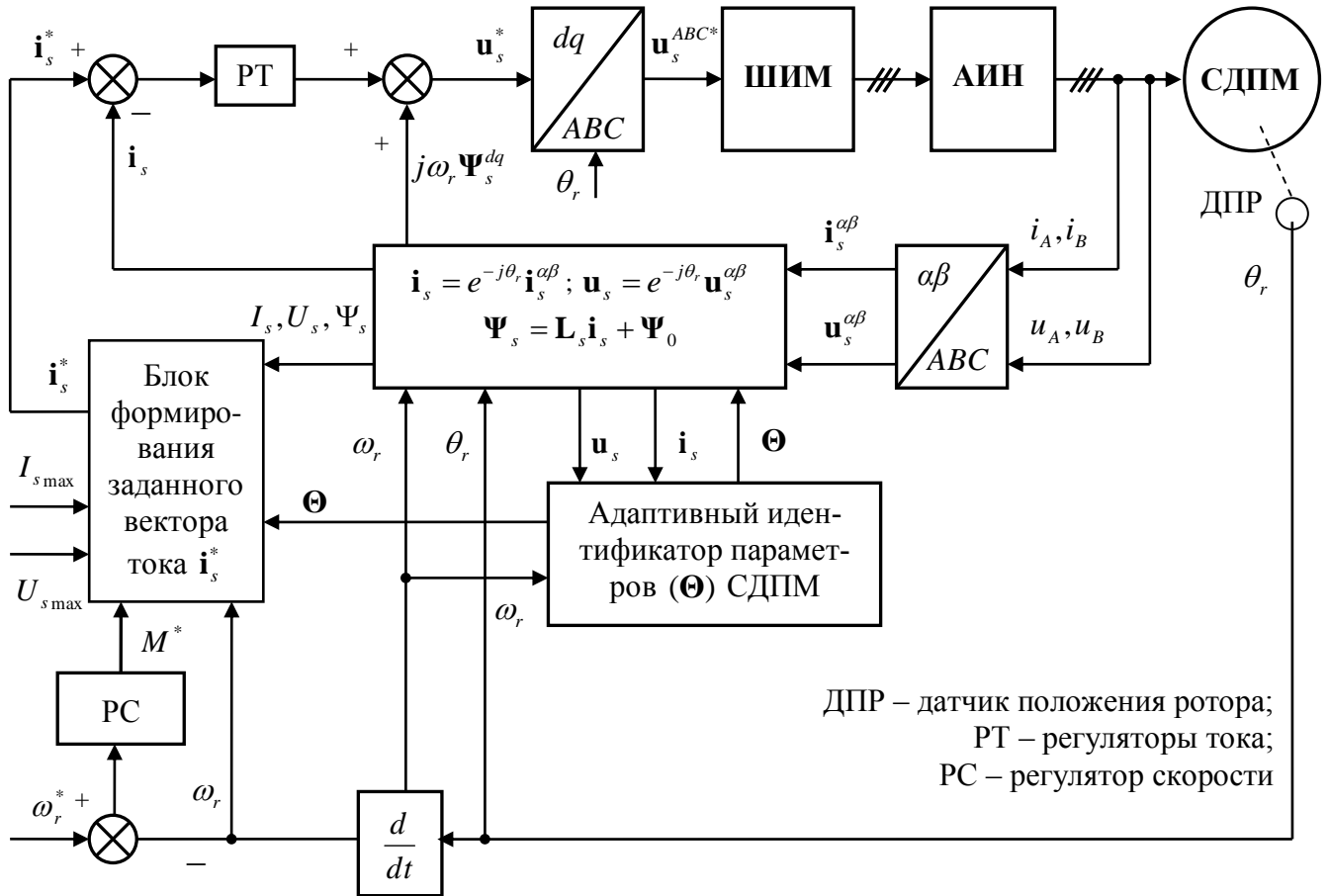


Рис. 1.20. Функциональная схема системы векторного управления СДПМ

Основой для синтеза системы векторного управления СДПМ является его математическая модель, записанная в системе координат (d, q) , ориентированной по ротору машины:

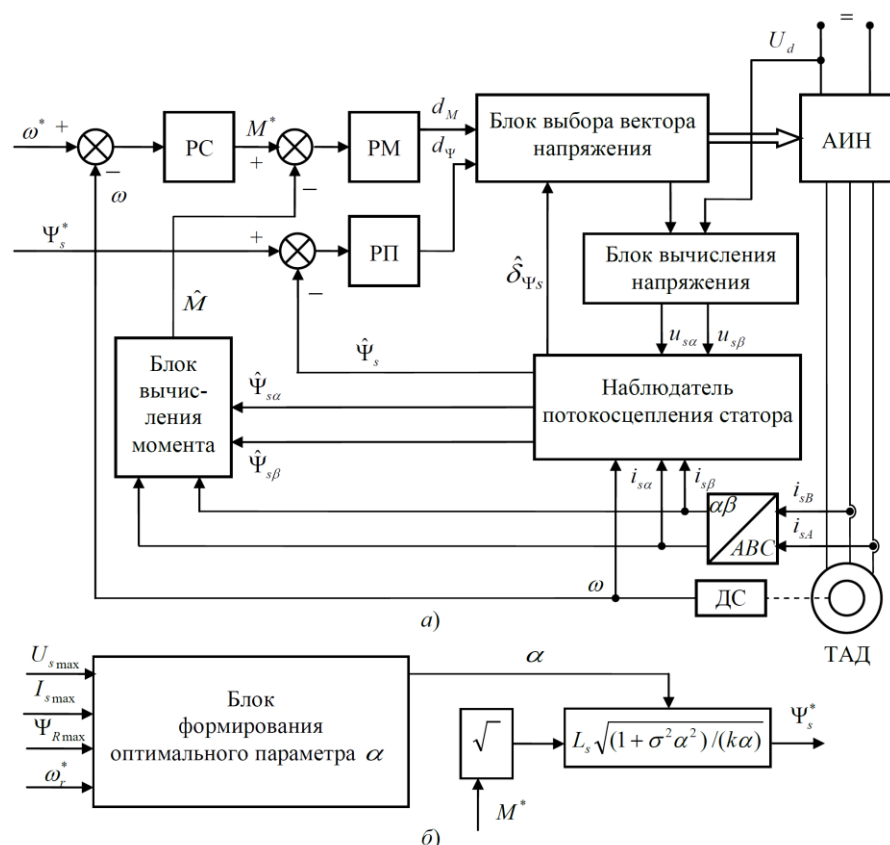
$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = (R_s + p\mathbf{L}_s)\mathbf{i}_s + j\omega_r \Psi_s; \\ \Psi_s = \mathbf{L}_s \mathbf{i}_s + \Psi_0; \quad M = 1,5z_p \operatorname{Im}\{\mathbf{i}_s \Psi_s^*\}, \end{cases} \quad (1.10)$$

где z_p – число пар полюсов; ω_r – электрическая частота вращения ротора; θ_r – электрический угол положения ротора; Ψ_0 – потокосцепление, созданное постоянными магнитами на роторе; \mathbf{L}_s – матрица полной индуктивности обмоток статора; Ψ_s^* – вектор, комплексно-сопряженный с Ψ_s ; $p = d/dt$ – оператор дифференцирования. Здесь и далее жирными шрифтами обозначены векторные величины или матрицы.

Системы прямого управления моментом электроприводов переменного тока

Продолжением и развитием векторного подхода к построению системы управления АД является метод прямого управления моментом (ПУМ – Direct Torque Control – DTC), предложенный японскими учеными в середине 1980-х г. Данный метод вызывает большой интерес у разработчиков и исследователей ЭП переменного тока из-за достоинств систем ПУМ:

- простоты реализации благодаря отсутствию операций преобразования координат; отсутствию широтно-импульсного модулятора питающего напряжения;
- высокой динамики контуров регулирования потокосцепления статора и момента благодаря применению гистерезисных регуляторов и таблицы оптимальных переключений полупроводниковых ключей преобразователя частоты (ПЧ).



РС – регулятор скорости; РМ – регулятор момента;
РП – регулятор потокосцепления статора; ДС – датчик скорости

Рис. 1.21. Структурная схема системы ПУМ АД
а) структурная схема системы ПУМ АД; б) структурная схема блока формирования задающего сигнала Ψ_s^*

выдают логические сигналы d_M , d_Ψ на блок выбора вектора напряжения

На рис. 1.21 представлена структурная схема системы ПУМ АД с введением блока формирования задающих воздействий по алгоритму оптимизации по суммарным потерям и перегрузочной способности привода.

В базовых системах ПУМ АД (рис. 4.2, а) регуляторы потока статора (РП) и момента (РМ), сравнивая на каждом шаге расчета их заданные значения Ψ_s^* , M^* с вычисленными значениями потокосцепления статора $\hat{\Psi}_s$ и \hat{M} ,

Здесь оптимальные режимы работы АД обеспечиваются регулированием модуля вектора потокосцепления статора по задаваемому значению Ψ_s^* , обеспечивающему условиям минимума потерь и максимума перегрузочной способности электропривода. Алгоритм формирования величины Ψ_s^* описан во главе 2.

[illegible]

Рис. 1.22. Функциональная схема системы ПУМ СДПМ

Системы прямого управления моментом с широтно-импульсным модулятором (ПУМ-ШИМ)

Необходимо отметить, что главным недостатком классических векторных систем управления АД является сложность их структуры, обусловленная использованием операций преобразования неподвижной системы координат во вращающуюся и обратно.

В классических системах ПУМ внедрение релейных регуляторов порождает основной недостаток данных СУ ЭП: частота переключения силовых ключей, зависящая от ширины петель гистерезиса регуляторов, не постоянна, что приводит к возрастанию коммутационных потерь в ПЧ, повышенной пульсации момента АД по сравнению с векторным методом управления ЭП. Данный недостаток можно устранять путем отказа от релейных регуляторов при применении пространственно-векторной модуляции выходного напряжения ПЧ вместо таблицы оптимальных переключений. В англоязычной технической литературе системы, построенные по этому принципу, носят название «direct torque control with space vector modulation» (DTC-SVM) – ПУМ с пространственно-векторной модуляцией (ПУМ-ВМ). Разумеется, вместо метода пространственно-векторной модуляции можно использовать любой из известных в теории преобразовательной техники методов ШИМ для формирования управляющего напряжения АД. В дальнейшем будем называть системы управления АД, построенные по данному принципу, системами «прямого управления моментом с ШИМ» (ПУМ-ШИМ).

Анализ литературных источников показывает, что в системах ПУМ-ШИМ, как в классических системах ПУМ, регулируемые переменными являются электромагнитный момент, модуль и/или угловое состояние (угол пространственного расположения θ_{Ψ_s} , угловая частота вращения ω_1) вектора потокосцепления статора Ψ_s . Цель регулирования – обеспечение минимального отклонения регулируемых величин от заданных значений – достигается формированием соответствующего вектора напряжения статорной обмотки \mathbf{u}_s .

На рис. 1.23 приведена обобщенная функциональная схема современных систем ПУМ-ШИМ, выведенная из результатов анализа различных трудов.

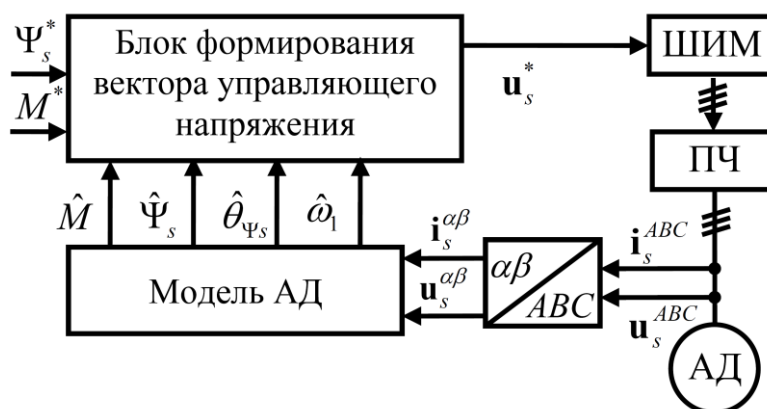


Рис. 1.23. Обобщенная функциональная схема систем ПУМ-ШИМ

Напряжение питания АД, обеспечивающее требуемый момент, формируется с помощью ПЧ, являющегося автономным инвертором напряжения (АИН) или преобразователем частоты с непосредственной связью. Синтез алгоритма ШИМ ПЧ определяется заданием вектора напряжения статора \mathbf{u}_s^* , полученным от выхода «блока формирования вектора управляющего напряжения», входные сигналы которого являются требуемыми значениями момента M^* , модуля Ψ_s^* вектора Ψ_s , а также текущими значениями \hat{M} , $\hat{\Psi}_s$, $\hat{\theta}_{\Psi_s}$ или $\hat{\omega}_1$, рассчитанными в модели двигателя на основании измеренных значений тока \mathbf{i}_s и напряжения \mathbf{u}_s статора. Здесь и далее отметкой «^» обозначают оцениваемые величины; верхним индексом «звездочка» – задающие сигналы.

Вместе с вектором Ψ_s также используется информация о векторе потокосцепления ротора Ψ_r , что мотивируется возможностью получения повышенной перегрузочной способности АЭП при поддержании постоянства модуля Ψ_r по сравнению с поддержанием постоянным Ψ_s , достижения высокой точности оценки $\hat{\Psi}_s$ в области низких скоростей через оценку $\hat{\Psi}_r$.

По нашему мнению, главное отличие между существующими системами ПУМ-ВМ составляет в принципе формирования вектора управляющего напряжения ПЧ \mathbf{u}_s^* , который можно разделить на две основных группы.

По *первому* принципу СУ моментом АД строится по подчиненной схеме: момент регулируется внешним контуром, а потокосцепление статора – внутренним. На выходе регулятора момента определяется угловое состояние (угол положения, угловая частота вращения [162]) вектора Ψ_s^* или частота скольжения электродвигателя. Полученные информации вместе с задающим модулем Ψ_s^* затем использованы для определения вектора Ψ_s^* в ортогональной неподвижной системе координат, связанной со статором. А вектор \mathbf{u}_s^* в свою очередь формируется регулятором потокосцепления статора согласно уравнению:

$$\mathbf{u}_s^* = p\Psi_s + R_s \mathbf{i}_s. \quad (1.11)$$

Можно реализовать (1.11) в двух вариантах: без регулирования и с регулированием Ψ_s .

Первый вариант основывается на уравнении (1.11), записываемом в разностном виде [155]:

$$\mathbf{u}_s^* = \frac{\Delta\Psi_s}{T_s} + R_s \mathbf{i}_s, \quad (1.12)$$

где $\Delta\Psi_s = \Psi_s^* - \Psi_s$ – необходимое приращение вектора Ψ_s , обеспечивающее требуемое приращение момента в расчетном периоде T_s .

Второй вариант реализации (1.11) составляет в организации замкнутого контура регулирования вектора Ψ_s согласно выражению:

$$\mathbf{u}_s^* = R_s \mathbf{i}_s + \omega_1 \Psi_s + K_P \Delta\Psi_s, \quad (1.13)$$

где K_P – коэффициент усиления пропорциональных (П) регуляторов Ψ_s .

Структурные схемы представления принципа формирования вектора \mathbf{u}_s^* через вектор Ψ_s по (1.12) и (1.13) иллюстрируются на рис. 1.24.

Системы с вычислением \mathbf{u}_s^* по (1.12) просты в реализации, поскольку при задании модуля вектора Ψ_s постоянным требуется только один ПИ регулятор момента для формирования углового состояния Ψ_s . Однако операция «чистого» дифференцирования Ψ_s по (1.11) имеет недостаток – высокая чувствительность к

помехам, обусловленным шумом измерения \mathbf{i}_s , неточной оценкой Ψ_s из-за изменения сопротивления статора R_s в зависимости от температуры.

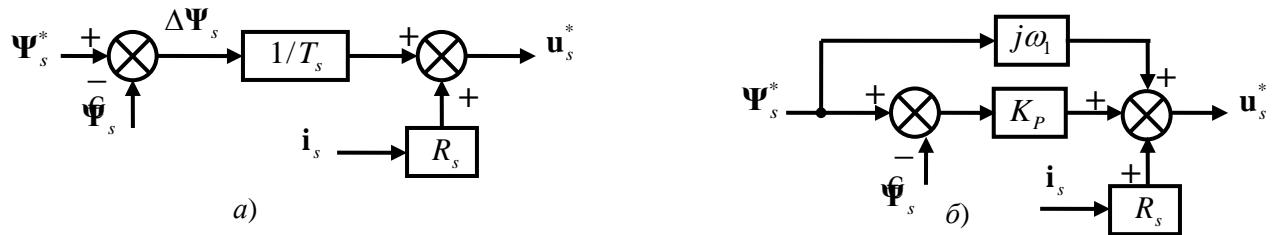


Рис. 1.24. Принцип формирования вектора управляющего напряжения \mathbf{u}_s^* через вектор Ψ_s : а) без регулирования Ψ_s ; б) с регулированием Ψ_s

В представлена система ПУМ-ВМ, построенная по подчиненной структуре, с внешним контуром регулирования момента и внутренним – Ψ_s , реализуемым по (1.13). Вычисление Ψ_s^* производится на основании заданий M^* , Ψ_r^* и частоты ω_1 , формируемой с выхода ПИ регулятора момента. При регулировании потокосцепления ротора структура СУ усложняется – требуются 4 регулятора: 2 для регулирования Ψ_s , 2 для момента и модуля вектора Ψ_r . Кроме того, настройка регуляторов осуществлена экспериментальным путем в связи с отсутствием математического описания связи между ω_1 и моментом. Это затрудняет процедуру проектирования СУ.

Второй принцип синтеза вектора управляющего напряжения \mathbf{u}_s^* заключается в установлении динамических связей между ним, моментом, его производной, и потокосцеплением статора Ψ_s , т.е. нахождение функции:

$$\mathbf{u}_s^* = f(M, \dot{M}, \Psi_s, \dot{\Psi}_s). \quad (1.14)$$

В системах ПУМ-ВМ, построенных по (1.14), удалось отдельно регулировать момент и потокосцепление ротора, что обеспечивает высокую динамику электропривода. В данных системах «блок формирования вектора управляющего напряжения» (рис. 1.23) представляет собой регуляторы момента и модуля вектора Ψ_s , реализуемые в различных видах:

- линейных регуляторов пропорционального (П), пропорционально-интегрального (ПИ) типов;

- нелинейных регуляторов на основе нейронных сетей, нечеткой логики, дискретных прогнозирующих регуляторов.

Метод нейро-нечеткого регулирования требует большого количества экспериментальных данных для обучения нейронных сетей, что затрудняет процедуру синтеза регуляторов в стадии их проектирования.

Системы с регулированием переменных состояния АД, построенные по принципу прогноза (вычисления) в следующем расчетном периоде сигнала \mathbf{u}_s^* , соответствующего требуемые приращения момента и вектора Ψ_s , обладают высокой вычислительной интенсивностью.

Большой практический интерес представляют системы с линейными регуляторами в связи с их простотой исполнения, хорошо развитой методикой проектирования. Однако предложенные разными авторами системы ПУМ-ШИМ с линейными регуляторами зачастую построены в системе координат, ориентированной по вектору потокосцепления статора, что требуется операция преобразования координат, как в классических векторных системах управления. В работе предложены системы ПУМ АД, которые лишены данного недостатка.

Предложено новое семейство систем ПУМ-ШИМ АД и СДПМ с линейными регуляторами потокосцеплений и момента. Реализация систем ПУМ-ШИМ АД производится в неподвижной системе координат, связанной со статором АД, а СДПМ – в системе координат, ориентированной по положению ротора. Синтез регуляторов момента, потокосцепления статора (или ротора) основан на дифференциальных уравнениях первого порядка, описывающих аналитические связи между динамикой изменения электромагнитного момента, потокосцеплений и управляющим напряжением.

Таким образом, ТЭП переменного тока на базе АД, СДПМ с ПУМ-ШИМ, являясь перспективным электроприводом, удовлетворяющим требованиям к высококачественному управлению моментом и высоким энергетическим показателям, служит предметом дальнейшего исследования в работе. В следующем разделе представлена обобщенная структура ТЭП АТС, построенная на базе АД и СДПМ.

1.3.2. Обобщенная структура ТЭП переменного тока

На основании вышеприведенного анализа структур систем тягового привода АТС и требований к ТЭП предложена обобщенная структура ТЭП переменного тока на базе АД и СДПМ, приведенная на рис. 1.25.

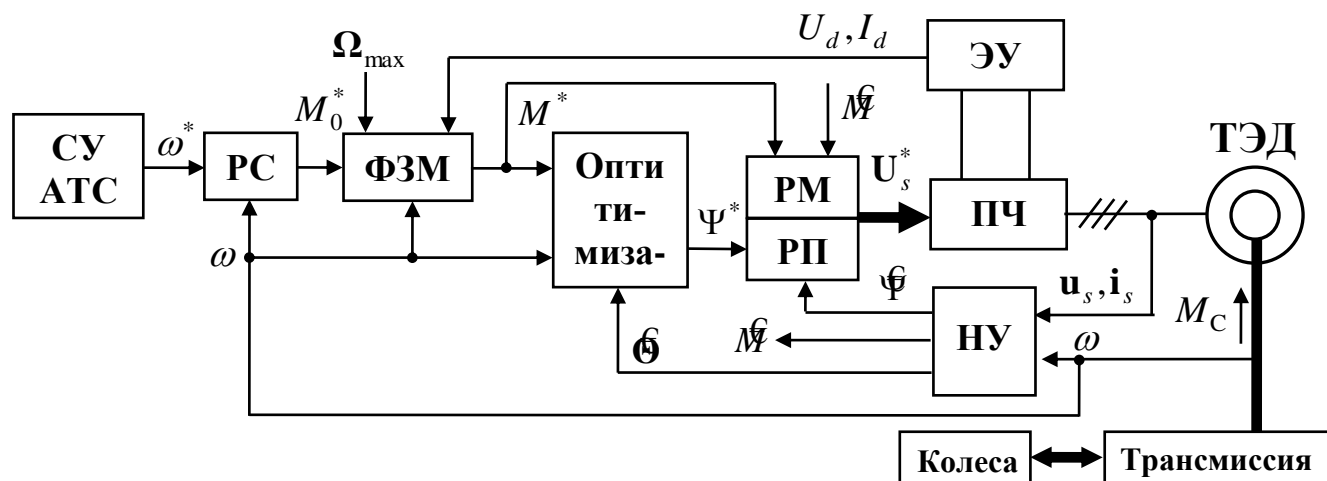


Рис. 1.25. Обобщенная структура ТЭП АТС на базе АД и СДПМ

На данном рисунке приняты следующие обозначения:

СУ АТС – система управления АТС – верхний уровень СУ ТЭП, предназначенная для формирования заданий частоты вращения ротора, момента ТЭД, согласно принципу организации управления гибридными силовыми установками, приведенному на рис. 1.15;

РС – регулятор скорости, который позволяет формировать задания момента M_0^* , требуемого контуром регулирования скорости;

ФЗМ – формирователь задания момента ТЭД M^* на основании требуемой величины M_0^* с учетом полного комплекса ограничений на ресурсы силовых агрегатов ТЭП (Ω_{\max}) и текущих значений выходных напряжения $U_{\text{ЭУ}}$ и тока $I_{\text{ЭУ}}$ энергоустановки; Ω_{\max} – векторы допустимых значений напряжений, токов, токосцеплений в системе;

$\mathbf{u}_s, \mathbf{i}_s$ – векторы текущих значений напряжения и тока статора ТЭД; \mathbf{U}_s^* – вектор задающих значений напряжения для ПЧ;

РМ – регулятор момента; РП – регулятор потока;

НУ – наблюдающее устройство; M, ω, Ψ – текущие значения электромагнитного момента, угловая частота вращения ротора, потокосцепление (статора или ротора) ТЭД, M^*, ω^*, Ψ^* – их задающие значения; Θ – оцениваемые параметры ТЭП;

M_c – приведенный к ротору ТЭД момент сопротивления движению ТЭП.

В СУ ТЭП предусматривается три контура регулирования: внешним контуром регулируется скорость ТЭД, внутренними контурами – момент и потокосцепление (статора или ротора). При необходимости возможно исключение внешнего контура регулирования скорости. В последнем случае задание M_0^* для контура электромагнитного момента формируется программным путем.

Блок «Оптимизатор» предназначен для формирования заданных значений потокосцеплений Ψ^* , обеспечивающих оптимальные режимы работы ТЭП, на основании текущей частоты ω и задания момента M^* .

Список литературы

1. Овсянников Е.М., Нгуен Куанг Тхиеу « Тяговые электроприводы и устройства энергообеспечения автотранспортных средств».-М: Издательство «Палеотип», 2009 г.-244 с.
2. Овсянников Е.М., Долбилин Е.В., Кошеляев Е.М. « Электрооборудование автотранспортных средств с тяговыми электроприводами».-М.: Издательство «Палеотип», 2010 г.-364 с.
3. Овсянников Е.М. Учебник. «Электрический привод».-М: Издательство Форум, 2011.-224 с.