

Силовая электроника

в гибридном приводе с топливными элементами

Часть 1

Быстрый прирост населения и стремительное развитие экономики в последние десятилетия привели к резкому скачку энергопотребления. Задача сбережения энергии приобрела глобальные масштабы, и ответом ведущих автопроизводителей на этот вызов мирового рынка стала разработка гибридных и полностью электрических транспортных средств (ТС).

**Саму Кукконен
(Samu Kukkonen)**

**Перевод:
Евгений Карташев**

Стоимость автомобилей с гибридным приводом пока еще очень высока, однако у потребителей появляется все больше стимулов приобретать их. Например в США, владельцы гибридомобилей могут оформить право на федеральные льготы по подоходному налогу. По данным службы внутренних доходов, такие машины квалифицируются с учетом долговременных налоговых вычетов, которые применяются для ТС с экологически чистой тяговой установкой. Данная политика предусматривает возможность единовременного вычета, который может быть использован потребителем в течение первого года ввода автомобиля в эксплуатацию.

В общем случае можно сказать, что гибридная установка объединяет лучшие рабочие характеристики двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и электрического мотора. Реальные гибридные устройства много сложнее, например, привод Toyota Hybrid System (THS) способен использовать энергию торможения, которая обычно уходит на нагрев тормозов, для заряда батареи и, соответственно, экономии топлива. Эта сложнейшая технология позволяет достичь существенного повышения эффективности работы привода и снижения выбросов CO₂.

Высокий интерес к развитию экологически чистого транспорта обусловлен прежде всего экологическими и социально-экономическими факторами. При этом активное внедрение полноценного электрического привода ограничено технологическими проблемами, связанными с производством и утилизацией аккумуляторов, а также неразвитостью инфраструктуры зарядных станций. Автомобили с альтернативными силовыми агрегатами являются переходным этапом между чисто электрическими ТС и машинами с ДВС. Сейчас их предлагают крупнейшие автоконцерны Европы, Америки и Азии.

Необходимость решения климатических и экологических проблем привела к активному поиску возобновляемых источников энергии, которые могут быть использованы для работы гибридного привода. В первую очередь, здесь следует упомянуть различные виды топливных элементов, наиболее перспек-

тивными из которых считаются мембранные ячейки с протонным обменом (PEMFC). Исследования показали, что лучше всего использовать их в сочетании с накопителями энергии (ESS), такими как электрохимические аккумуляторы и суперконденсаторы. Подобные системы известны как гибридные силовые агрегаты на топливных элементах. Они имеют много преимуществ по сравнению с простыми источниками питания (ИП) на топливных элементах, однако их структура и алгоритмы управления гораздо сложнее.

В гибридном приводе топливные элементы и ESS могут быть соединены «пассивно», т. е. когда оба источника энергии подключены непосредственно к одной шине питания. При этом распределение токов в системе определяется их внутренним импедансом. Такая схема гибрида является простейшей, но она имеет ряд недостатков, один из которых — невозможность управления энергетическими потоками. Эту проблему можно решить путем применения каскадных DC/DC-преобразователей, подключенных к источникам энергии. Использование электронных конвертеров в гибридной трансмиссии обеспечивает много преимуществ, но они имеют и свои проблемы, которые будут рассмотрены далее.

Топливные элементы преобразуют химическую энергию водорода (или, в некоторых случаях, других видов топлива) в электрическую энергию постоянного тока. Аналогичные процессы протекают внутри электрохимических аккумуляторов. Разница состоит в том, что на топливные элементы извне непрерывно подаются новые реагенты, что обеспечивает их бесперебойное функционирование.

Топливные элементы не способны менять направление потока энергии, которая всегда поступает в нагрузку. Исключение составляют обратимые элементы, используемые в некоторых специальных устройствах. В отличие от них, аккумуляторы представляют собой электрохимические накопители, преобразующие электроэнергию в химическую и наоборот, таким образом, она может идти в любом направлении.

Запас энергии и плотность мощности батареи зависят от ее типа и особенностей техноло-

гии изготовления. Эти показатели не могут быть оптимизированы одновременно, поэтому, в зависимости от применения, необходим соответствующий компромисс. Суперконденсаторы хранят электроэнергию в электрическом поле, они отличаются от обычных емкостей использованием метода ионного переноса, который обеспечивает значительно более высокие показатели удельной емкости. По объемной плотности энергии суперконденсаторы не могут конкурировать с батареями, хотя их удельная мощность значительно выше. Использование этих компонентов в сочетании с аккумуляторами в гибридной трансмиссии на топливных элементах существенно повышает возможности силовой установки. Кроме того, наличие суперконденсаторов позволяет демпфировать переходные процессы благодаря очень низкому внутреннему сопротивлению.

Обычные ИП на топливных элементах в транспортных применениях имеют ряд недостатков по сравнению с гибридными системами:

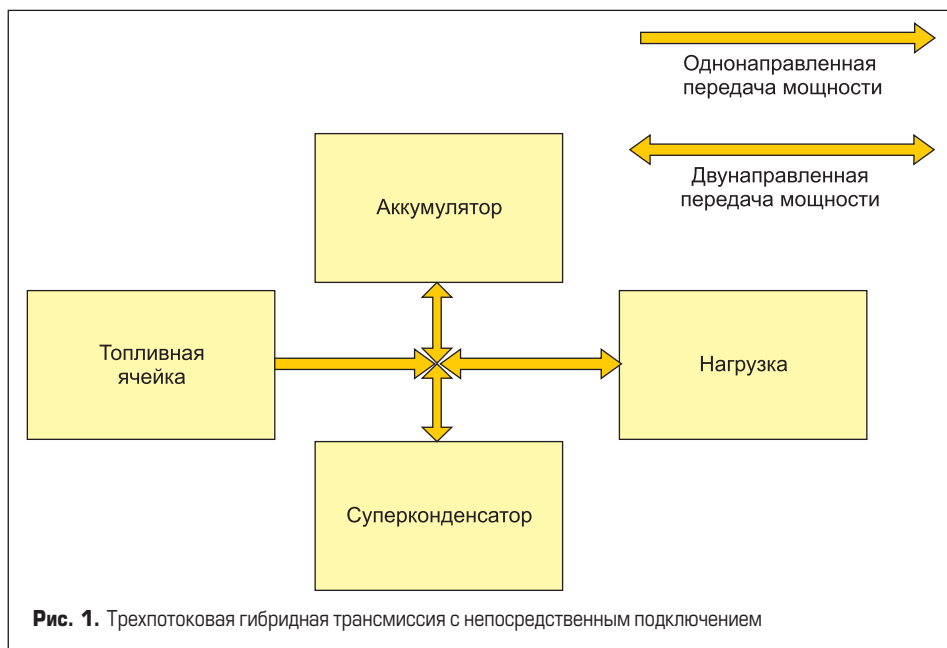
- топливные элементы должны быть рассчитаны на пиковую мощность нагрузки, в результате чего они получают большими и очень дорогими [3];
- компромисс между сроком службы и эффективностью работы топливных элементов зависит от нагрузки, которая постоянно меняется;
- большие потери мощности: энергия торможения не может быть запасена для последующего использования.

Отмеченных недостатков лишена гибридная трансмиссия, построенная на основе топливных элементов в сочетании с накопителем энергии, в качестве которого могут быть использованы аккумуляторы, суперконденсаторы или их соединение. В подобной силовой установке можно использовать небольшие (и менее дорогие) топливные элементы, рассчитанные на среднюю мощность потребления. Срок их службы увеличивается при выборе оптимальной рабочей точки (деградация платинового катализатора топливного элемента сводится к минимуму путем поддержания низкого потенциала ячеек ($<0,8\text{ В}$) [4]) и демпфированием переходных режимов нагрузки, обеспечиваемом ESS.

Это означает, что система накопления энергии должна обладать способностью к подавлению переходных режимов и накоплению энергии, генерируемой во время рекуперативного торможения [5, 6]. Для лучшего понимания принципа работы гибридного силового агрегата на топливных элементах рассмотрим систему с непосредственным подключением (рис. 1).

Устройство, показанное на рис. 1, известно как трехпоточковая гибридная трансмиссия, поскольку, кроме топливных элементов, оно содержит два накопителя энергии. Гибридная трансмиссия на топливных ячейках с одним блоком ESS называется двухпоточковой [2].

Устройство функционирует следующим образом: поскольку компоненты системы подключены напрямую к одной и той же шине,



они работают с одинаковым уровнем напряжения. Это означает, что распределение токов определяется собственным импедансом компонентов. Суперконденсатор имеет самое низкое внутреннее сопротивление, но и разряжается очень быстро. Благодаря этому он способен обрабатывать высокочастотные переходные процессы в силовом каскаде.

Аккумулятор обладает более высоким импедансом, но он может выдержать большие токи в течение длительного времени. Это означает, что батарея будет демпфировать низкочастотные переходные процессы. Внутреннее сопротивление топливных элементов самое высокое, поэтому их задачей является поддержание постоянной мощности, а также и зарядка аккумулятора и суперконденсатора при малой нагрузке.

Согласно [5], увеличение выходной мощности топливных элементов от 10 до 90% может занять до 2 с. Кроме того, их срок

службы сокращается при больших колебаниях мощности потребления. Гибридная силовая установка гораздо более устойчива к переходным процессам, чем обычная система на топливных элементах. Это достигается благодаря наличию дополнительных ESS: они улучшают динамическое поведение системы в целом и демпфируют переходные процессы в топливных элементах, увеличивая срок их службы.

В своей работе [2] Karimäki экспериментально определил распределение токов в трехпоточковой гибридной трансмиссии с непосредственным подключением (рис. 1). На рис. 2 показаны результаты измерений при начальном заряде батареи (SoC) 0,7 — данное состояние позволяет наглядно продемонстрировать распределение токов в различных элементах гибридной системы.

Представленные графики показывают, что выходная мощность топливных элементов

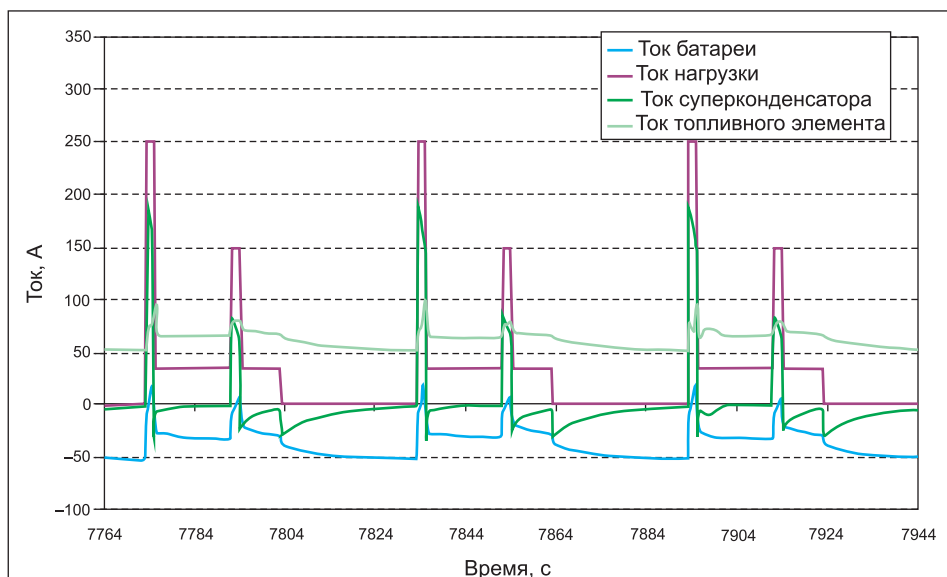
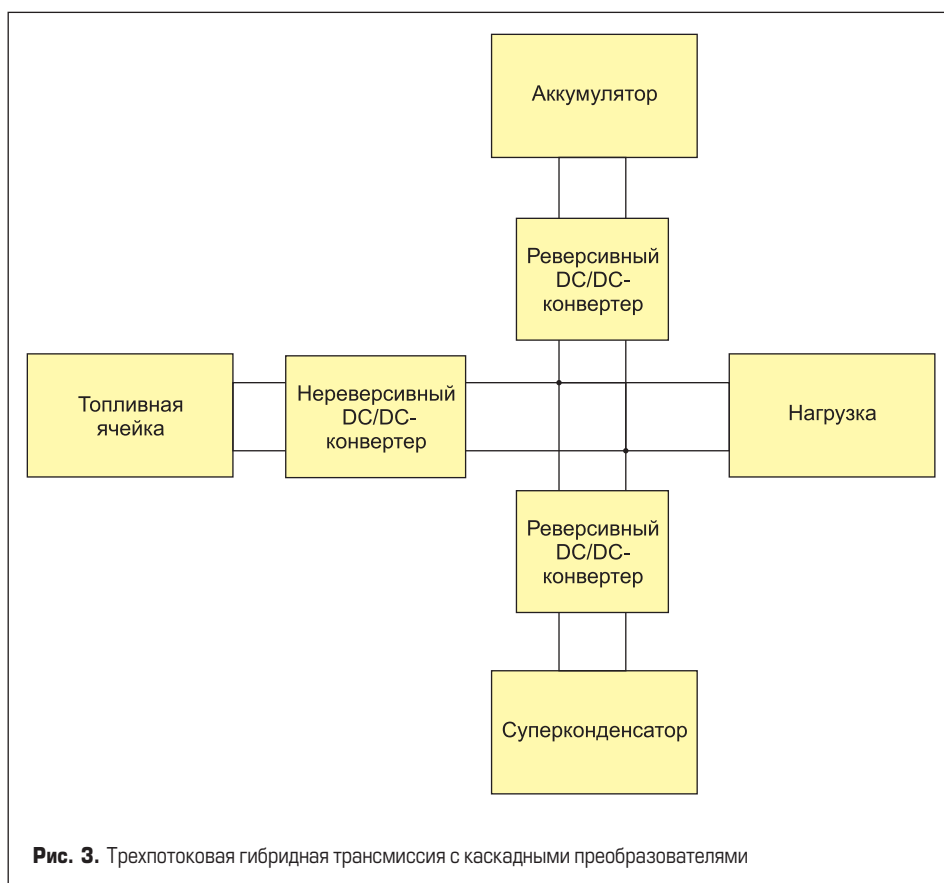


Рис. 2. Распределение токов в трехпоточковой гибридной трансмиссии с непосредственным подключением



практически постоянна, аккумулятор и суперконденсатор гораздо сильнее реагируют на переходные процессы. Видно, что батарея заряжена большую часть времени, и суперконденсатор обрабатывает ее практически полностью, обеспечивая очень хорошее демпфирование переходных режимов. В гибридном приводе без суперконденсаторов уровень токов пульсаций топливных элементов будет гораздо выше, что приведет к сокращению их ресурса [2].

Недостатком гибридной трансмиссии с непосредственным подключением является невозможность контроля распространения токов и необходимость работы всех компонентов при одинаковом уровне напряжения. Последнее условие приводит к неоптимальности как электрических характеристик, так и конструкции отдельных блоков привода. Это также означает, что заряд суперконденсатора не может быть использован полностью, поскольку параметр SoC является функцией напряжения. При отсутствии контроля энергетических потоков нельзя регулировать выходной ток топливного

элемента и управлять процессом заряда/разряда аккумулятора и суперконденсатора.

От некоторых из отмеченных недостатков гибридной трансмиссии можно избавиться с помощью электронных конвертеров. Схема трехпоточкового гибридного силового агрегата на рис. 3 дополнена каскадными преобразователями, она также известна как «DC-шинная» структура, в которой каждый из источников подключен к звену постоянного тока через индивидуальный конвертер.

Каждый из источников энергии используется со своим конвертером, соответственно, в показанной схеме их может быть не более трех. Дополнительные электронные преобразователи устанавливаются между нагрузкой и шиной постоянного тока, но в рамках данной статьи они не рассматриваются. Возможные конфигурации схем для трехпоточковой гибридной трансмиссии приведены в таблице.

Современные электрические транспортные приводы отличаются высокими мощностями потребления, что, в конечном итоге, требует

увеличения напряжения DC-шины (V_{DC}). Для поддержания токовых нагрузок в тяговой системе на разумном уровне напряжение питания повышается до 650 В. В схеме с непосредственным подключением силового привода переход на высокое напряжение DC-шины создаст трудности при выборе топливных элементов, батареи и суперконденсатора, поскольку в этом случае приходится соединять последовательно большое число отдельных ячеек.

Применение каскадных DC/DC-преобразователей позволяет несколько смягчить данную проблему, поскольку в этом случае выходное напряжение источников энергии может быть меньше V_{DC} . Тем не менее оно не должно быть слишком низким, чтобы токи конвертеров находились на приемлемом уровне. Вариант трехпоточкового гибридного привода, где каждый источник энергии снабжен DC/DC-преобразователем (табл., конфигурация № 7), является самым универсальным, поскольку он позволяет контролировать токи во всех цепях. Однако здесь существует ряд проблем:

- Большое число DC/DC-конвертеров может оказать заметное влияние на эффективность привода (КПД одного преобразователя находится в диапазоне 80–95% в зависимости от режима работы и конфигурации [7]).
- Могут возникнуть трудности при одновременном контроле распределения тока нагрузки и выходного напряжения всех трех преобразователей.
- Тот факт, что ни один электронный узел не соединен напрямую с DC-шиной, может создать проблему в плане контроля ее напряжения. Этот вопрос решается путем подключения батареи или суперконденсатора непосредственно к шине.
- Схема трехпоточкового гибридного привода является достаточно сложной, и ее реализация может оказаться коммерчески нецелесообразной.

Преимущество трехпоточкового гибридного привода с прямым подключением перед двухпоточковым заключается в том, что суперконденсатор обладает хорошими возможностями по подавлению переходных режимов. При использовании DC/DC-преобразователей появляется возможность регулировать выходной ток топливных элементов, ограничить диапазон его изменения и, кроме того, защитить ячейки от реверсного потока мощности. Отсюда следует, что необходимость в применении суперконденсатора может отпасть, если батарея способна работать при больших изменениях тока нагрузки.

Сказанное особенно справедливо в отношении литий-ионных аккумуляторов, поскольку они имеют гораздо более высокую стойкость к переходным процессам, чем свинцово-кислотные батареи [8, 9]. Тем не менее рекуперативное торможение становится проблематичным, когда аккумулятор полностью заряжен. При отсутствии суперконденсатора и использовании топливных элементов и батареи с каскадным DC/DC-преобразователем мы получаем двухпоточковый вариант привода, показанный на рис. 4.

Таблица. Конфигурации трехпоточковой гибридной трансмиссии

Конфигурация	DC/DC-конвертер, топливные ячейки	DC/DC-конвертер, батарея	DC/DC-конвертер, суперконденсатор	Схема
1				Рис. 1
2		X		
3		X	X	
4			X	
5	X			Рис. 3
6	X	X		
7	X	X	X	
8	X		X	

Устройство, представленное на рис. 4, проще, чем трехпоточковый гибридный силовой агрегат. Снижение количества DC/DC-преобразователей оказывает положительное влияние на общий КПД трансмиссии. Управлять конвертерами в этом случае удобнее, поскольку мощность нагрузки делится между только двумя блоками. Двухпоточковая трансмиссия проще, она имеет меньшую стоимость и габариты. Тем не менее для такого силового агрегата требуется батарея, способная выдерживать любые переходные процессы в нагрузке, при этом топливный элемент должен работать при постоянной мощности.

При использовании некоторых типов аккумуляторов, например свинцово-кислотных, решение этой задачи оказывается очень сложным [9]. Для их работы в ряде случаев требуется дополнительная фильтрация, которая обеспечивается опять же путем установки суперконденсатора. Он может быть подключен к DC-шине через собственный DC/DC-преобразователь (рис. 3) или параллельно с аккумуляторной батареей, как показано на рис. 5.

Кроме подавления переходных помех, суперконденсатор увеличивает пиковую мощность ESS, что позволяет снизить требования к батарее по предельным режимам и обеспечить высокую плотность энергии. Суперконденсатор имеет очень высокую энергоэффективность, это приводит к существенному снижению потерь в процессе заряда/разряда аккумулятора и суперконденсатора, что особенно важно при использовании батарей с малой энергетической эффективностью.

На схеме (рис. 5) аккумулятор и суперконденсатор соединены параллельно, они имеют один общий DC/DC-преобразователь для подключения к DC-шине. Суперконденсатор обеспечивает подавление переходных помех и поддерживает постоянство тока батареи. Недостаток этой конструкции состоит в том, что заряд (SoC) суперконденсатора используется не полностью, так как он зависит от напряжения питания.

Надежность гибридной трансмиссии зависит от корректного нормирования параметров топливных элементов и накопителя энергии. Основной принцип состоит в том, что топливные элементы должны обеспечивать среднюю мощность, а блок ESS проектировался с учетом переходных режимов. Поэтому очевидно, что правильный выбор источников во многом определяется областью применения и рабочими режимами.

Например, рабочие режимы вильчатого подъемника и легкового автомобиля совершенно разные, у автомобиля с прицепом они не такие, как у автомобиля без груза, и т. д. Профиль нагрузки определяет средние и пиковые требования по мощности, т. е. необходимую нагрузочную способность топливных элементов и ESS.

Следовательно, для нормирования параметров источников энергии, прежде всего, следует точно определить характеристики нагрузки. Этот вопрос в отношении гибридного автомобиля на топливных элементах исследо-

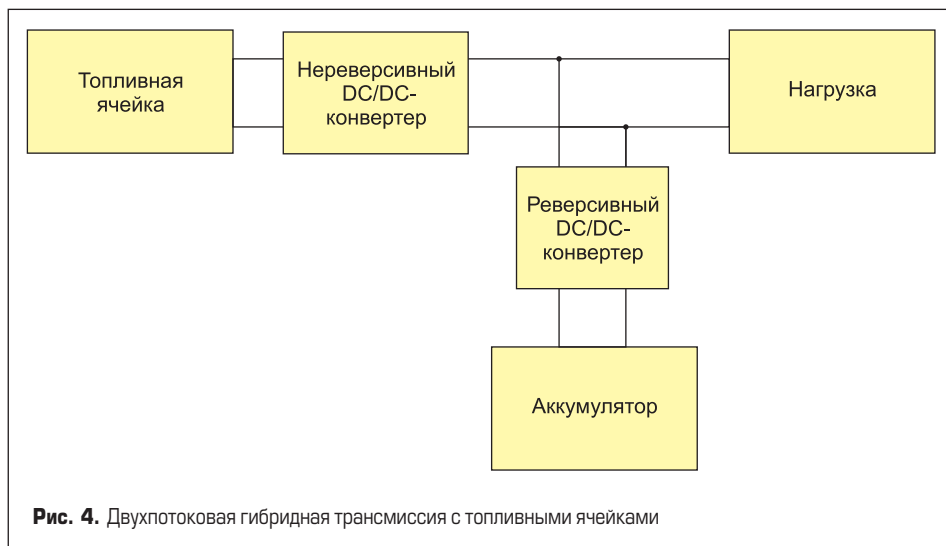


Рис. 4. Двухпоточковая гибридная трансмиссия с топливными ячейками

ван в [5]. Целью данной работы была разработка гибридной системы, в которой минимизирован расход водорода с учетом следующих ограничений по управляемости ТС:

- максимальный преодолеваемый подъем, соответствующий способности поддерживать скорость 110 км/ч на 5%-ном уклоне;
- время разгона от 0 до 100 км/ч (очень важный потребительский показатель, определяющий привлекательность топливных элементов).

Первое из двух указанных ограничений задает требования к средней мощности, от которой зависят параметры топливных элементов, а второе определяет уровни статической и динамической мощности накопителя энергии. Моделирование различных профилей управления позволяет сформировать требования к компонентам привода в виде графиков. С их помощью достаточно легко определить параметры компонентов гибридной системы для различных условий движения.

Понятно, что эти данные не могут быть непосредственно адаптированы для конкретного привода определенного транспортного средства. Тем не менее они способны помочь в задании ограничений, которые в конечном

счете определяют правильный подбор компонентов гибридной системы.

Управление гибридной трансмиссией с непосредственным подключением не представляет особой сложности, поскольку контролируемым узлом здесь является только топливный элемент. Использование в системе мощных электронных преобразователей приводит к необходимости контроля электрического тока в различных цепях системы. Для управления конвертерами топливных элементов и ESS должна быть выработана правильная стратегия, предусматривающая безопасную остановку привода при потере управления.

Гибридная система с непосредственным подключением обладает низкими возможностями по контролю распределения токов, который необходим по многим соображениям. Основной причиной является необходимость оптимизации потребления водорода при поддержании SoC накопителя энергии в разумных пределах [10]. Таким образом, DC/DC-преобразователи выполняют две важные функции: они согласуют различные уровни напряжения и контролируют распределение тока в системе. Основная проблема заклю-

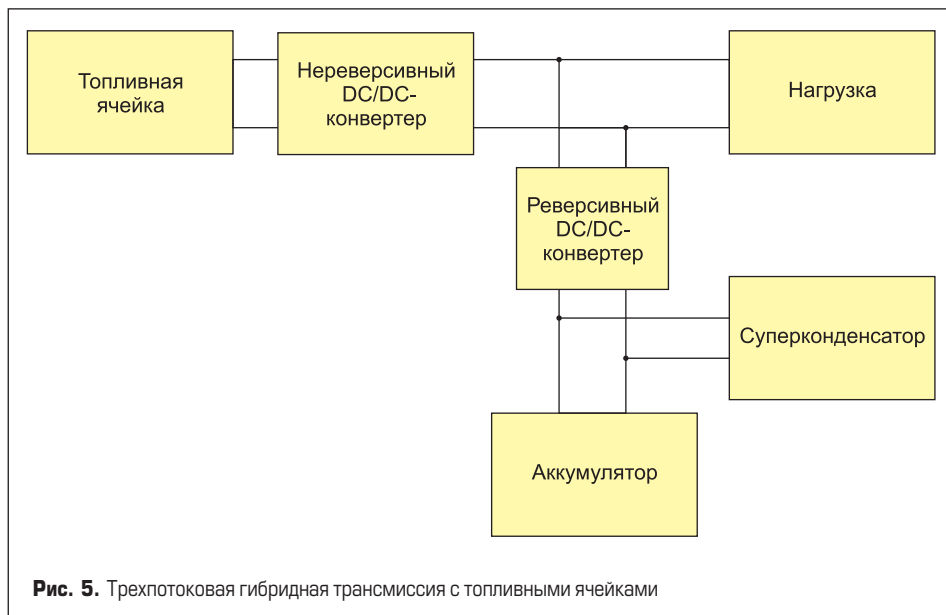


Рис. 5. Трехпоточковая гибридная трансмиссия с топливными ячейками

чается в выработке алгоритмов управления конвертерами.

Рассматриваются два основных профиля нагрузки: предсказуемый и частично или полностью непредсказуемый [10]. Очевидно, что оптимизировать стратегию управления энергетическими потоками прогнозируемых нагрузок гораздо проще, чем непредсказуемых. Данный вопрос рассматривается во многих работах, в частности в [10, 11].

Корректная стратегия управления энергетической системы обеспечивает оптимальную регулировку выходной мощности топливного элемента и ESS. Поскольку топливные элементы имеют плохую динамику, однонаправленный преобразователь не должен быть быстрым, что упрощает цепь управления.

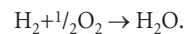
Кроме того, диапазон изменения тока топливных элементов должен быть ограничен для увеличения срока их службы. Это легко сделать с помощью каскадного DC/DC-конвертера. С другой стороны, если суперконденсатор подключен с помощью собственного преобразователя, он должен быть очень быстрым, чтобы поддерживать возможности суперконденсатора по подавлению переходных режимов. Конвертер должен быть двунаправленным, иметь высокую пиковую мощность и обладать адекватным коэффициентом повышения/понижения, поскольку напряжение суперконденсатора может сильно изменяться относительно уровня SoC.

Предсказуемые профили нагрузки в наибольшей мере определяют стратегию управления преобразователем суперконденсатора. Если конвертер не выбран, то можно спрогнозировать изменение нагрузки и задать режимы работы преобразователя с учетом реальных переходных процессов, что позволит улучшить динамические характеристики. Проблема заключается в том, что все возможные вариации нагрузки не могут быть заранее точно определены. Например, если погрузчик поднимает контейнер, то начало этого

процесса описать достаточно просто, однако очень трудно оценить фактическое значение требуемой мощности, если вес контейнера неизвестен.

Топливные элементы, батареи и суперконденсаторы

Топливные элементы преобразуют химическую энергию водорода (или других видов топлива) в постоянный ток без фактического процесса горения. Аналогичный процесс происходит внутри электрохимической батареи, разница состоит в том, что в топливный элемент извне непрерывно подаются новые реагенты, что обеспечивает бесперебойную выработку электроэнергии. В отличие от батарей, топливные ячейки не в состоянии работать при изменении направления потока мощности (за исключением некоторых специальных конструкций). Основная реакция в ячейке описывается следующим образом:



Водород (H_2) подается на анод топливного элемента, а кислород (O_2) — на катод. Между ними находится электролит, который препятствует смешиванию реагентов, но обеспечивает прохождение ионов. При окислении водорода высвобождаются электроны, которые движутся от анода к катоду по внешней цепи, производя электрическую энергию. Ядра атомов водорода проходят через электролит в катод, где кислород преобразуется в воду (H_2O).

Существует множество типов топливных элементов с различными характеристиками, их классификация производится по виду электролита. Наиболее распространены топливные элементы с полимерной обменной мембраной (PEMFC), щелочные топливные элементы (AFC), топливные элементы на основе фосфорной кислоты (PAFC) и расплавленного карбоната (MCFC), а также твердооксидные топливные элементы (SOFC). Компоненты первого типа (PEMFC) обладают многими важными свойствами, необходимыми в транспортных применениях [1], поэтому далее мы будем рассматривать только их.

Топливные элементы PEMFC относятся к классу низкотемпературных (+60...+80 °C), т. е. они имеют короткое время запуска по сравнению с высокотемпературными элементами. Низкая рабочая температура требует применения платинового катализатора на электродах, чтобы реакция была достаточно быстрой. Платина — дорогостоящий материал (в среднем 55 \$/г по данным 2010 г. [12]), и она формирует большую долю затрат. Однако развитие технологий позволило снизить необходимое для производства количество платины до 0,2 г/кВт [13], что соответствует примерно 11 \$/кВт.

Ячейка PEMFC построена таким образом, что в середине топливного элемента в электролите находится полимерная обменная

мембрана, а по обе стороны от нее расположены электроды, как показано на рис. 6. На краях этой сборки на верхней части электродов имеются пористые газодиффузионные слои, благодаря им реагенты способны диффундировать на электроды.

Рядом с газодиффузионными слоями размещаются биполярные пластины, обеспечивающие проточные каналы для реагентов и охлаждающей жидкости. Они также используются в качестве проводников, передающих электричество во внешнюю цепь. Свойства электролита имеют решающее значение для функционирования топливных элементов: он должен обладать хорошей ионной проводимостью для ионов водорода и препятствовать смешиванию реагентов. Электролит также должен быть высококачественным и сохранять свои свойства в течение всего срока службы топливных элементов.

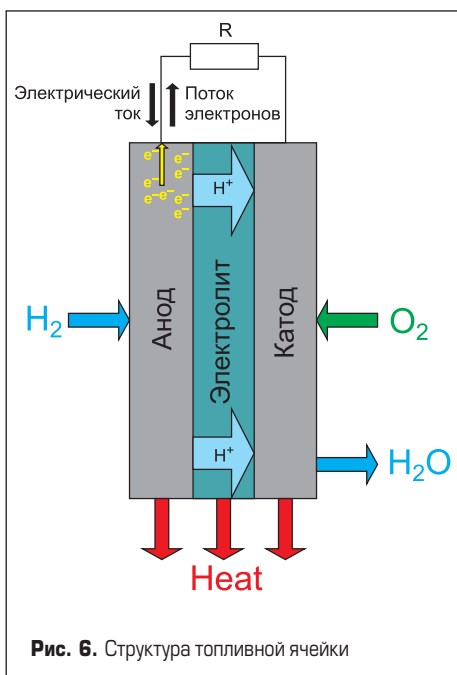
Надежность топливных ячеек существенно улучшилась в последние годы. Например, Ballard дает пятилетнюю гарантию на свои элементы типа HD6, наработка которых составляет 12 000 ч [14]. Существует много факторов, влияющих на срок службы. В первую очередь, топливные элементы должны использоваться при постоянной нагрузке, поскольку изменения напряжения ячейки ускоряют процесс деградации платинового катализатора, что приводит к постоянному снижению максимальной выходной мощности.

Изменение условий нагрузки также влияет на температурный и водный баланс элементов. Его нарушение создает напряженность в электролитной мембране, что приводит к увеличению размера частиц платины и эффективному уменьшению общей площади катализатора [2]. Кроме того, нарушение нормального процесса запуска и выключения топливного элемента может привести к развитию углеродной коррозии и соответствующему сокращению ресурса [15]. Решение вышеперечисленных проблем обеспечивается при должном управлении силовыми электронными преобразователями и другими устройствами, работа которых связана с топливными элементами.

Продолжение следует

Литература

1. Thounthong P., Davat B., Rael S. & Sethakul P. Fuel cell high-power applications // Industrial Electronics Magazine. IEEE 2009. Vol. 3, No. 1.
2. Karimäki H. Ajoneuvokäytön polttokennoteholähteen hybridisointi — teoreettinen ja kokeellinen tarkastelu. Master of Science ed. Tampere University of Technology. 2009.
3. Burke A. F. Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles // Proceedings of the IEEE 2007. Vol. 95, No. 4.
4. Borup R. L., Davey J. R., Garzon F. H., Wood D. L. & Inbody M. A. PEM fuel cell electrocatalyst durability measurements // Journal of Power Sources 2006, 12/7. Vol. 163, No. 1.



5. Bernard J., Delprat S., Buchi F. N. & Guerra T. M. Fuel-Cell Hybrid Powertrain: Toward Minimization of Hydrogen Consumption // Vehicular Technology. IEEE Transactions on 2009. Vol. 58, No. 7.
6. Bauman J. & Kazerani M. A Comparative Study of Fuel-Cell–Battery, Fuel-Cell–Ultracapacitor, and Fuel-Cell–Battery–Ultracapacitor Vehicles // Vehicular Technology. IEEE Transactions on 2008. Vol. 57, No. 2.
7. Al Sakka M., Van Mierlo J., Gualous H. & Lataire P. Comparison of 30KW DC/DC converter topologies interfaces for fuel cell in hybrid electric vehicle // Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on. 2009.
8. A123 Systems Technical data from A123 Systems web page, 2010. www.a123systems.com/a123/technology [2010, 8/24].
9. Bentley P. & Stone D. A. The parallel combination of a valve regulated lead acid cell and supercapacitor for use as a hybrid vehicle peak power buffer // Power Electronics and Applications. 2005. European Conference on. 2005.
10. Bernard J., Delprat S., Guerra T. M. & Büchi F. N. Fuel efficient power management strategy for fuel cell hybrid powertrains // Control Engineering 84 Practice 2010. Vol. 18, No. 4.
11. Li X., Xu L., Hua J., Lin X., Li J. & Ouyang M. Power management strategy for vehicular-applied hybrid fuel cell/battery power system // Journal of Power Sources 2009, 6/15. Vol. 191, No. 2.
12. Johnson Matthey Platinum Today, the worlds leading authority on platinum group metals, 2010. www.platinum.matthey.com/
13. Spendelow J., Martin K. E. & Papageorgopoulos D. Platinum Group Metal Loading. www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9018_platinum_group.pdf.
14. Ballard Integration of heavy-duty PEM fuel cell systems. 2008. http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/Polttokennot/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Seminaarit/17.9.2008_Finland-Germany_workshop/Straub.pdf [2010, 5/12].
15. Shen Q., Hou M., Liang D., Zhou Z., Li X., Shao Z. & Yi B. Study on the processes of start-up and shutdown in proton exchange membrane fuel cells // Journal of Power Sources 2009, 4/15. Vol. 189, No. 2.