Силовая электроника

в гибридном приводе с топливными элементами

Часть 2. Топливные элементы

Саму Кукконен (Samu Kukkonen)

Перевод: Евгений Карташев

Топливные элементы не способны функционировать самостоятельно, для их работы требуются дополнительные устройства, которые обеспечивают непрерывную подачу реагентов и охлаждающей жидкости и поддерживают водный баланс внутри ячеек. Эти устройства называются компонентами энергетического баланса (BoP), на рис. 7 показана их связь с ячейками PEMFC. Некоторые детали, необходимые для работы практической системы, исключены из схемы для упрощения. Компоненты BoP контролируются в зависимости от выходного тока топливных элементов. Этим занимается схема управления, получающая измерительные сигналы из разных точек устройства.

Работа компонентов энергетического баланса оказывает влияние на общую эффективность системы. Это происходит потому, что схема BoP нуждается в электрической энергии, уровень которой зависит от выходного тока топливных ячеек. Например, катодный нагнетатель, являющийся неотъемлемой частью системы управления топливными элементами, может потреблять сотни ватт или даже киловатт, в зависимости от размеров блока (5–15% от мощности PEMFC). Чаще всего BoP работает при уровне напряжения, отличном от выходного напряжения топливных элементов. Кроме того, некоторые элементы функционируют на постоянном токе, в то время как другие нуждаются в AC-сигнале. Для решения этой задачи требуются DC/DC- и DC/AC-преобразователи.

Схема BoP может питаться от шины постоянного тока, для этого чаще всего требуется понижающий DC/DC-преобразователь. Он должен быть достаточно мощным, чтобы обеспечить необходимый ток, но при этом не должен оказывать влияние на точность измерений и систему управления. Следует обратить особое внимание на электромагнитные помехи (EMI), генерируемые импульсными преобразователями, входящими в состав гибридного привода.

Разработка электронных конвертеров для топливных элементов требует понимания их динамических характеристик. Топливные ячейки являются источниками напряжения, однако их потери сильно зависят от выходного тока из-за большого внутреннего сопротивления. На уровень выходного сигнала топливных элементов влияют многие факторы. Теоретическое значение напряжения холостого хода может быть рассчитано на основе энергии Гиббса,

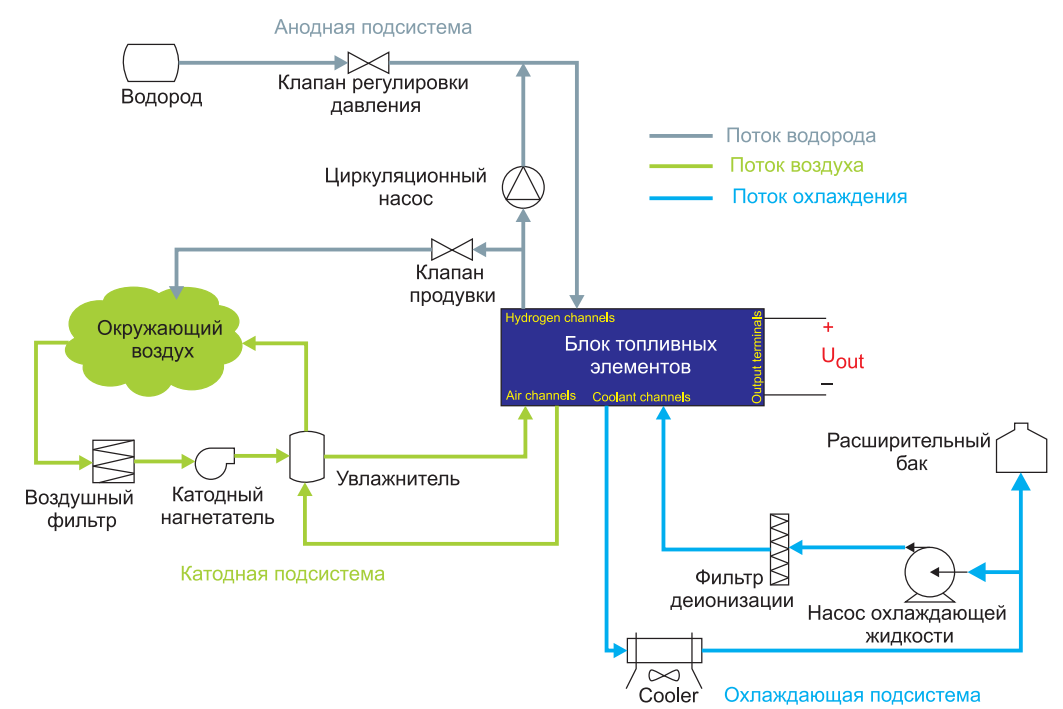

Рис. 7. Компоненты системы энергетического баланса BoP (Balance of Plant)

которая определяется как термодинамический потенциал, являющийся мерой «полезности» или инициированной работы, получаемой от термодинамической системы при постоянной температуре и давлении. Для единичной ячейки PEMFC это порядка 1,23 В, т. е. топливный элемент является низковольтным и сильноточным устройством.

На практике для увеличения напряжения ячейки соединяются последовательно в батареи топливных элементов [16]. Величина 1,23 В представляет собой теоретическое напряжение идеальной разомкнутой цепи в стандартных условиях (25 °С и 101,325 кПа). Под нагрузкой с ростом тока напряжение начинает быстро падать. Это обусловлено наличием потерь в ячейке, основными из которых являются потери активации, потери за счет тока утечки, омические и потери вследствие массообмена.

Потери активации возникают из-за медленной кинетики реагентов, присутствующих на электродах. Чтобы реакция происходила достаточно быстро, необходимо наличие сигнала, создающего отклонение от равновесного состояния и образующего перепад напряжения при низких плотностях тока. Сначала оно резко падает при малых токах, затем уменьшается медленнее с увеличением нагрузки.

Потери за счет утечки вызваны диффузией водорода непосредственно в катод через электролит и, следовательно, они не связаны с генерацией электричества. Данный механизм потерь, не создающих никаких перепадов напряжения, может быть использован для анализа состояния топливных элементов.

Омические потери обусловлены конечной проводимостью структуры топливных элементов. В эквивалентной схеме они моделируются с помощью эквивалентного последовательного резистора, т. е. линейно зависят от тока ячейки.

Потери за счет массообмена вызваны снижением давления реагента в активной зоне на электродах. Концентрация реагента на электродах уменьшается с ростом выходного тока, поэтому данный вид потерь доминирует при больших нагрузках [16].

Вольт-амперные характеристики одиночной ячейки PEMFC показаны на рис. 8. Кривая построена для демонстрации различных механизмов потерь и не основана на данных каких-либо измерений. На рисунке хорошо видно, что выходное напряжение топливных элементов сильно зависит от тока. Умножение напряжения на плотность тока позволяет построить кривую плотности мощности, показанную на рис. 9.

На графике (рис. 9) отмечена точка максимальной мощности (MPP) топливного элемента, в которой он генерирует наибольшую доступную энергию. Сравнение рис. 8 и 9 показывает, что ячейка имеет максимальную отдачу при напряжении, примерно равном половине сигнала холостого хода. Как следствие, оно варьируется в широких пределах, и силовые электронные преобразователи должны быть в состоянии обработать эти изменения. Эффективность топливного элемента зависит от его выходного тока, на рисунке 10 представлены графики КПД батареи ячеек и совокупного КПД PEMFC и BoP.

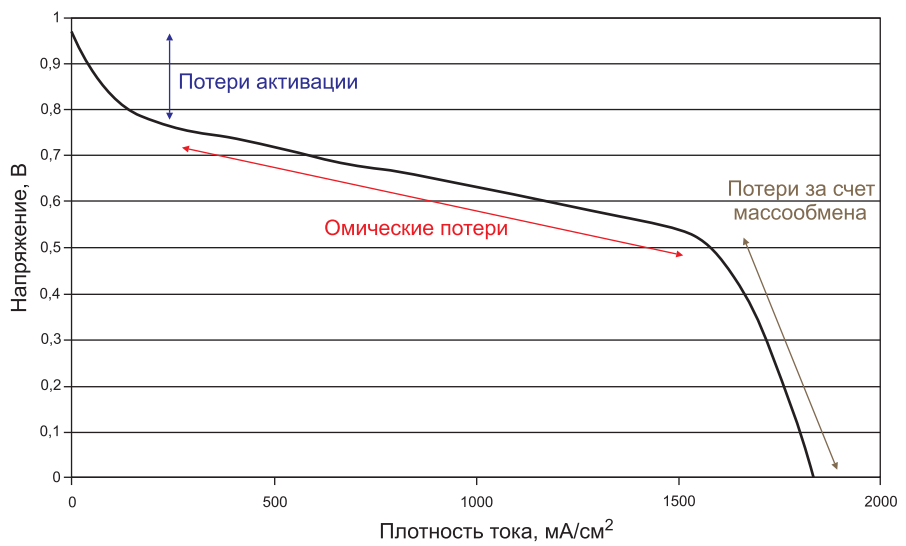

Рис. 8. Кривая поляризации топливной ячейки [2]

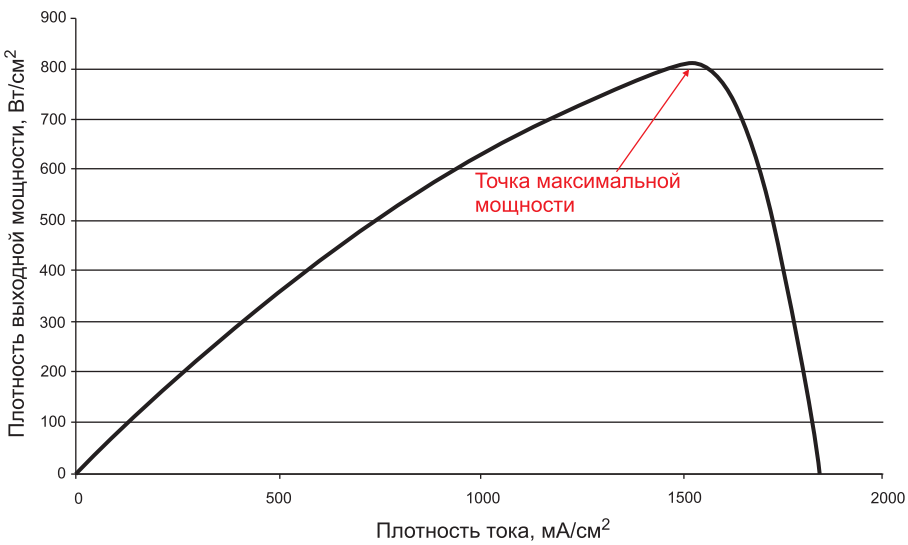

Рис. 9. Кривая плотности мощности топливной ячейки

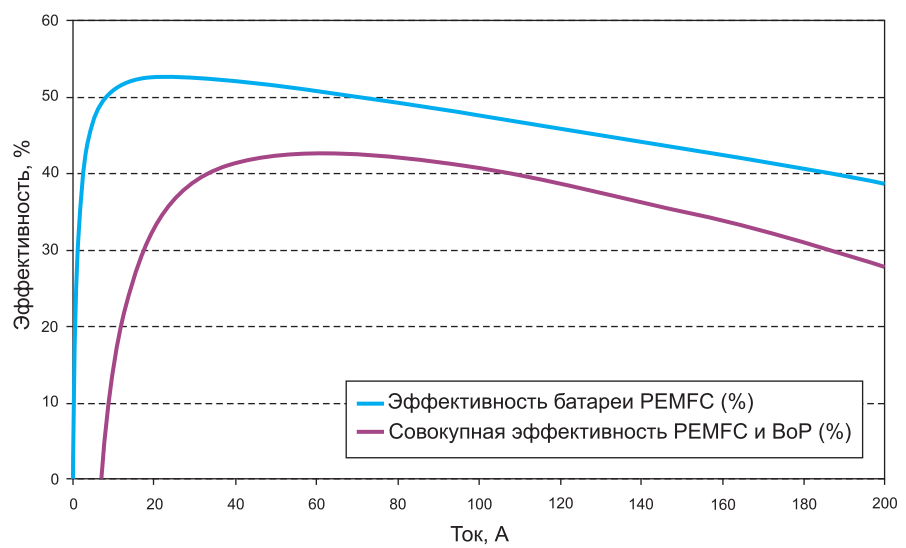

Рис. 10. Эффективность топливной ячейки [2]

Кривая на рис. 10 получена в результате измерений режимов батареи топливных элементов Nedstack P8 мощностью 8 кВт. Батарея развивает наибольшую номинальную мощность на токе примерно 200 А. По рисунку видно, что ячейки работают с максимальной эффективностью при очень низких нагрузках (синяя линия). Однако их КПД должен оцениваться по совокупной эффективности в сочетании с BoP (фиолетовая линия). КПД системы BoP сам по себе также зависит от выходного тока батареи топливных элементов.

При анализе совокупной эффективности системы максимум КПД немного смещается в сторону более высоких токов и достигает предела на отметке 43%, что являются типовым показателем для устройств с топливными элементами. У лучших коммерческих систем эффективность достигает значения 55–60%. По кривым плотности мощности (рис. 9) и эффективности (рис. 10, видно, что максимальные значения этих показателей не могут быть получены одновременно. Оптимальная рабочая точка достигается путем выбора режима управления каскадным DC/DC-преобразователем, работающим с топливными элементами.

Кроме влияния на эффективность топливных ячеек, система BoP снижает их электрическую реакцию. Процессы внутри ячейки идут быстро, и она успевает отрабатывать стремительные перепады выходного тока. Однако отклик источника реагентов оказывается гораздо медленнее. Переходные процессы с миллисекундной длительностью не создают проблем, поскольку имеется достаточное количество газовых реагентов, хранящихся вблизи электродов. С другой стороны, при возникновении переходных процессов большей длительности (десятки миллисекунд) источник реагентов не может отрабатывать достаточно быстро рост потребления мощности. Система BoP является, следовательно, причиной плохой динамики. Если на выходе топливного элемента возникает большой положительный скачок тока, он приводит к образованию т. н. реагентового голода. Этот эффект создает дополнительное падение напряжения, наблюдаемое до тех пор, пока источник реагентов не сможет отреагировать на изменение тока.

Реагентовый голод фатально влияет на надежность топливных элементов, поэтому его следует исключить при всех условиях эксплуатации. Понижающий преобразователь должен обеспечить ступенчатое ограничение выходного тока топливных ячеек. При этом решается вопрос недостатка реагентов, однако уменьшается скорость реакции системы топливных элементов. Следует отметить, что скорость изменения выходного тока ячейки может быть ограничена на любом уровне, и только его быстрое увеличение способно привести к реагентовому голоду [1].

Для определения мощности электронного преобразователя важно знать спектр внутреннего сопротивления топливного элемента, поскольку ячейка, как источник энергии, взаимодействует с понижающим конвертером. Это взаимодействие и способность топливных элементов к ослаблению пульсаций могут быть определены на основе спектрального состава их импеданса. Существует возможность смоделировать режимы работы ячейки с помощью эквивалентной схемы, построенной на стандартных электрических компонентах, при условии, что она работает в фиксированном режиме [17]. Подобная широко используемая схема приведена на рис. 11.

К сожалению, эта модель не учитывает паразитные индуктивности проводников, соединяющих топливные элементы и DC/DC-преобразователь. Важно включить эти индуктивности в эквивалентную схему, поскольку они определяют импеданс топливных элементов на высоких частотах, т. е. на частотах коммутации ключей DC/DC-конвертера. Индуктивность уменьшает возможности топливных элементов по ВЧ фильтрации и усиливает проблему EMI. Влияние паразитных элементов может быть смоделировано путем добавления последовательных индуктивностей в эквивалентную электрическую схему, как сделано, например, в [18]. Улучшенная модель показана на рис. 12 (EFC — теоретическое значение напряжения разомкнутой цепи топливного элемента; ΔU_{act} — потери активации анода и катода (представлены сопротивлением R_a); ΔU_{trans} — потери за счет массообмена (представлены сопротивлением R_a); ΔU_{ohmic} — падение напряжения на сопротивлении электродов и мембраны (представлено сопротивлением R_{ohmic}); C — двухслойный конденсатор; L — общая паразитная индуктивность проводников; i_{out} — выходной ток топливного элемента; u_{out} — реальное выходное напряжение топливного элемента).

Двухслойный конденсатор C в структуре топливного элемента является ключевым компонентом, определяющим его динамическое поведение. Для заданных условий эксплуатации параметры эквивалентной схемы остаются примерно постоянными. Если режимы работы изменяются, характеристики модели должны быть скорректированы в соответствии с новой рабочей точкой [17]. При моделировании спектра импеданса топливной ячейки, показанного на рис. 13, использовались следующие величины:

$$R_a = 1{,}07 \text{ Ом};$$
$$R_{ohmic} = 1 \text{ Ом};$$
$$C = 36 \text{ мФ};$$
$$L = 5{,}0 \text{ мкГн}.$$

В [17] в качестве L использовано значение эквивалентной последовательной индуктивности (ESL) конденсатора, имитирующее поведение эквивалентной схемы. Следует отметить, что кривая на рисунке предназначена только для демонстрации поведения топливных элементов. Фактические значения на графике не имеют особого практического значения, главную ценность имеет форма кривой импеданса.

Рис. 13 ясно показывает, что импеданс топливного элемента становится более индуктивным на высоких частотах. Такое «индуктивное» поведение проявляется на частоте переключений DC/DC-конвертеров, поэтому оно может усиливать проблемы с электромагнитными помехами. В этом случае требуется установка дополнительного EMI-фильтра. Интересно отметить, что двухслойный конденсатор на высоких частотах действует как короткозамкнутый элемент. Поэтому любая высокочастотная составляющая тока будет замыкаться через эту емкость и теоретически не сможет принимать участие в каких-либо химических реакциях внутри топливного элемента [19].

Силовые электронные преобразователи работают в режиме ВЧ-коммутации, при этом образуются пульсации тока и напряжения. Проектировщику необходимо знать предельные возможности топливных элементов по работе в условиях пульсаций и разрабатывать конвертер с учетом данных ограничений. К сожалению, последствия от воздействия

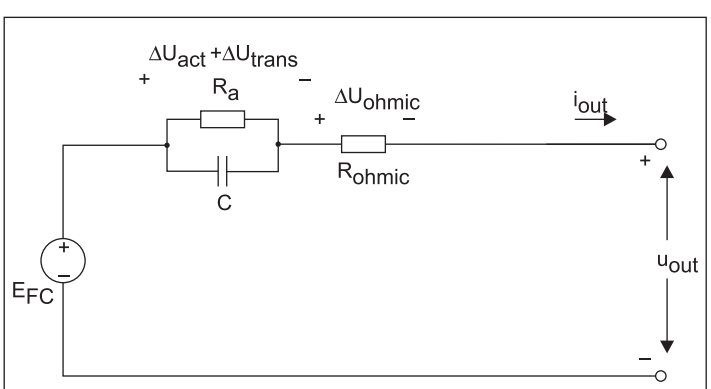

Рис. 11. Упрощенная эквивалентная электрическая схема топливной ячейки

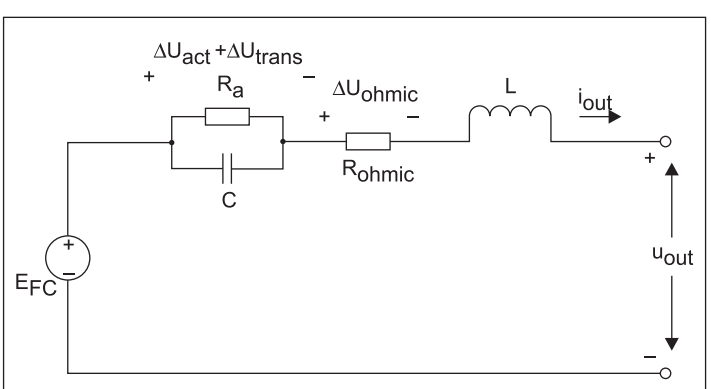

Рис. 12. Эквивалентная электрическая схема топливной ячейки с паразитными индуктивностями

пульсаций на производительность и срок службы топливных элементов исследованы недостаточно хорошо [20]. Тем не менее в последние годы в этой части достигнут некоторый прогресс [19, 21]. Было изучено два типа пульсаций: на частоте переключения и АС-составляющая, возникающая при однофазном преобразовании. Однофазные инверторы создают колебания в звене постоянного тока, имеющие частоту в два раза выше основной частоты выходного тока.

В [4] изучается влияние циклического режима работы на производительность топливных элементов. Выяснено, что изменения напряжения ячейки, вызванные колебаниями мощности потребления, увеличивают размеры частиц платины, в результате чего энергетические возможности топливного элемента постоянно снижаются. К сожалению, эти исследования проводились только на очень низких частотах, скорость изменения напряжения в одной ячейке составляла всего лишь порядка 10 мВ/с.

В [20] высказано предположение, что условия подачи реагентов влияют на срок службы топливных элементов. Была создана динамическая модель, позволяющая моделировать состояние реагентов на частотах между 30 и 1250 Гц. Это дало возможность оценить эффект от воздействия колебаний, создаваемых работой однофазного инвертора. Предварительные результаты показывают, что для исключения влияния пульсаций на надежность топливных элементов их частота должна быть выше 120 Гц или размах не должен превышать 8% от постоянной составляющей. Эти результаты были получены путем моделирования и не проверялись на практике.

В [19] изучается взаимосвязь токов пульсаций на частоте коммутации и напряжения топливных элементов. С этой целью была разработана малосигнальная модель с использованием импедансной спектроскопии. Полученные результаты проверялись на реальных топливных ячейках, подключенных к понижающему преобразователю без фильтрации. Исследования показали, что токи высокой частоты протекают через двухслойный конденсатор, что позволяет подавить высокочастотные колебания напряжения внутри топливных элементов. Следовательно, уровень напряжения пульсаций определяется только омическим сопротивлением и паразитными индуктивностями, как видно на рис. 12. К сожалению, двухслойный конденсатор не способен ослабить низкочастотные колебания, поэтому однофазный инвертор создает гораздо большие флуктуации напряжения.

Влияние пульсаций тока на надежность и срок службы топливных ячеек в [19] не исследовалось. Теоретически, у двухслойного конденсатора отсутствует передача носителей заряда. Это означает, что высокочастотные пульсации должны иметь значительно меньшее воздействие на ресурс топливных элементов, чем низкочастотные, поскольку ВЧ-токи замыкаются через емкость С. Однако в данной работе не указано, насколько большое значение тока способен подвить двухслойный конденсатор. Также не изучалось воздействие, оказываемое на сам конденсатор и мембрану. Аналогичные результаты получены в [20].

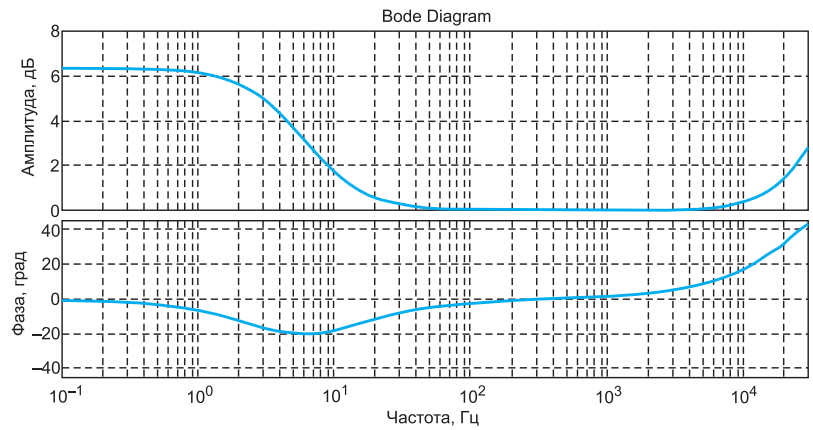

Рис. 13. Примерный спектр импеданса топливного элемента

В [21] описана экспериментальная система, созданная для оценки воздействия пульсаций на топливные элементы. Опыты проводились на двух сборках мощностью 600 Вт. Первая работала в номинальных стационарных условиях на токе 250 А в течение 1000 ч, вторая — в условиях динамических изменений тока 250 А на частоте 1 кГц (синусоидальные пульсации ±10%) в течение 1000 ч. Измерения проводились периодически на обеих сборках, результаты сравнивались в конце 1000-часовых циклов. Измерения показали, что в установившемся режиме напряжение топливного элемента спадает со скоростью 56 мкВ/с (на ячейку), а в динамике — 61,6 мкВ/с. Полученные данные позволяют сделать вывод, что высокочастотные пульсации имеют незначительное влияние на срок службы топливных элементов, по крайней мере в течение первых 1000 ч. В то же время видно, что эффект от низкочастотных пульсаций может оказаться гораздо более существенным. Для решения этой проблемы был предложен ряд мер [22, 23], однако физические ограничения относительно конструкции топливных элементов пока что не определены.

Очевидно, что низкочастотные колебания должны быть сведены к минимуму. В [20] высказано предположение, что размах НЧ компоненты не должен превышать 8% от постоянной составляющей напряжения. Это условие может быть хорошей отправной точкой для формирования технических требований. Выяснено, что ВЧ-пульсации не оказывают ощутимого влияния на ресурс ячеек, по крайней мере в течение первых 1000 ч работы. Можно провести и более продолжительные эксперименты, чтобы убедиться в том, что полученные результаты справедливы и для всего срока службы. Нет никаких оснований ожидать, что скорость спада напряжения увеличится после 1000 ч, однако проведенные 1000-часовые испытания не доказали однозначно, что этот показатель остается постоянным либо изменится.

Продолжение следует

Литература

13. www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9018_platinum_group.pdf.
14. http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/Polttokennot/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Seminaarit/17.9.2008_Finland-Germany_workshop/Straub.pdf.
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. Vol. 189. № 2.
16. www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/seca/pubs/FCHandbook7.pdf
17. Ordonez M., Sonnaillon M. O., Quaicoe J. E. & Iqbal M. T. An Embedded Frequency Response Analyzer for Fuel Cell Monitoring and Characterization // Industrial Electronics. IEEE Transactions. 2010. Vol. 57. № 6.
18. Laffly E., Pera M. & Hissel D. Dynamic Model of a Polymer Electrolyte Fuel Cell Power Device // IEEE Industrial Electronics. IECON 2006 — 32nd Annual Conference. 2006.
19. Fontes G., Turpin C., Astier S. & Meynard T. A. Interactions Between Fuel Cells and Power Converters: Influence of Current Harmonics on a Fuel Cell Stack // Power Electronics. IEEE Transactions. 2007. Vol. 22. № 2.
20. Gemmen R. S. Analysis for the Effect of Inverter Ripple Current on Fuel Cell Operating Condition // Journal of Fluids Engineering. 2003. Vol. 125. № 3.
21. Wahdame B., Girardot L., Hissel D., Harel F., Francois X., Candusso D., Pera M. C. & Dumercy L. Impact of power converter current ripple on the durability of a fuel cell stack // Industrial Electronics. ISIE 2008. IEEE International Symposium. 2008.
22. Changrong L. & Jih-Sheng L. Low Frequency Current Ripple Reduction Technique With Active Control in a Fuel Cell Power System With Inverter Load // Power Electronics. IEEE Transactions. 2007. Vol. 22. № 4.
23. Shireen W., Kulkarni R. A. & Arefeen M. Analysis and minimization of input ripple current in PWM inverters for designing reliable fuel cell power systems // Journal of Power Sources. 2006. Vol. 156. № 2.