

Начало №№ 4–6'2015

# Силовая электроника в гибридном приводе с топливными элементами.

## Часть 5. Результаты исследований

**В данной статье приводятся результаты исследований двухпоточковой и трехпоточковой трансмиссии, полученные при моделировании рабочего цикла, описанного в предыдущей части.**

**Саму Кукконен  
(Samu Kukkonen)**

**Перевод:  
Евгений Карташев**

### Двухпоточковый гибридный привод на топливных элементах

На рис. 38 приведены эпюры напряжений и токов DC-шины. Видно, что напряжение звена постоянного тока поддерживается на номинальном уровне 350 В с незначительными колебаниями, независимо от нагрузки. Ток топливного элемента является постоянным, когда ток нагрузки выше или равен нулю. Во время рекуперативного торможения он уменьшается, а затем увеличивается, постоянно находясь под контролем. Гибридная система при этом работает корректно.

На рис. 39 показаны режимы работы DC-шины (напряжение DC-шины и ток элементов гибридного привода) в течение первого рабочего цикла (первые 60 с моделирования). Создается впечатление, что в начале моделирования величина  $V_{DC}$  резко растет от нуля до 350 В. Это объясняется тем, что началь-

ное значение напряжения на конденсаторе ЗПТ составляет 350 В, но для низкочастотного фильтра исходная величина установлена нулевой, что вызывает резкое повышение уровня сигнала. Также интересно отметить, что ограничение скорости нарастания тока топливных элементов (80 А/с) нелинейно увеличивает ток ячеек по отношению к DC-шине, поскольку их выходная мощность также нелинейно зависит от тока. Те же рассуждения применимы и в том случае, когда ток топливного элемента уменьшается при рекуперативном торможении.

На рис. 40 показаны кривые тока и напряжения на выводах топливных элементов, видны незначительные возмущения тока в те моменты, когда двунаправленный преобразователь меняет направление потока энергии оказывает незначительное влияние на напряжение DC-шины, поскольку двунаправленный преобразователь достаточно медленно реагирует

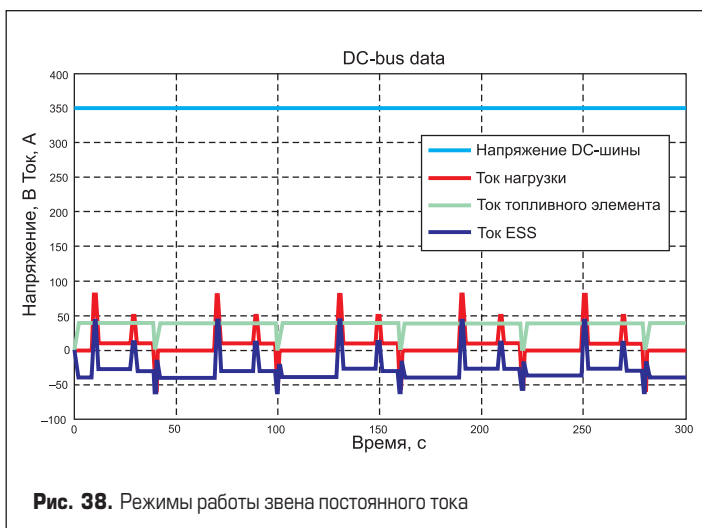


Рис. 38. Режимы работы звена постоянного тока

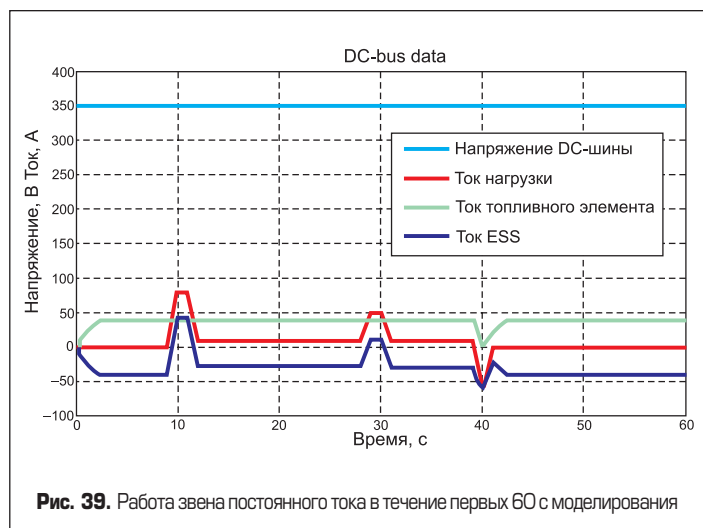
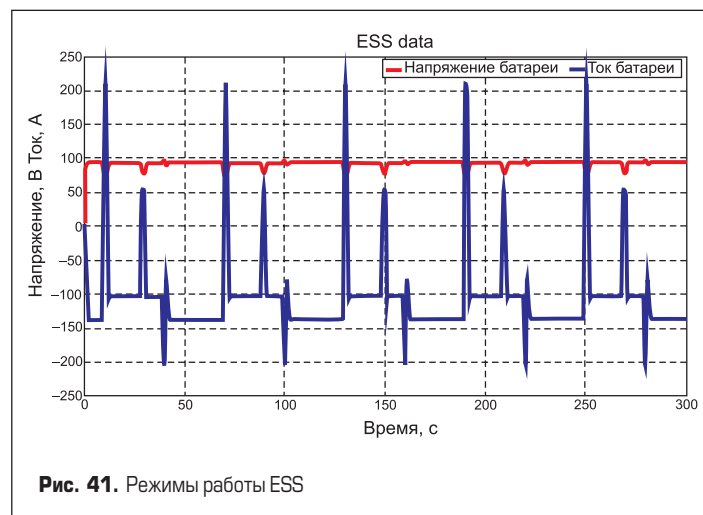
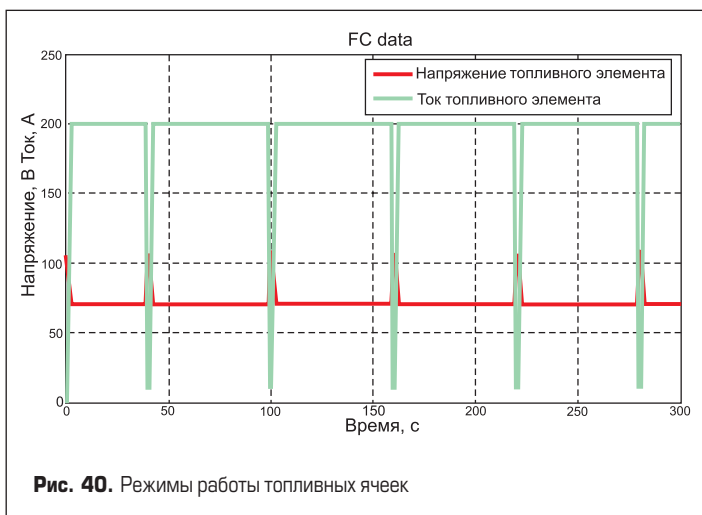


Рис. 39. Работа звена постоянного тока в течение первых 60 с моделирования



на этот процесс. Является ли это реальной проблемой или ошибкой моделирования, невозможно проверить без экспериментальных исследований.

Эпюры напряжения и тока батареи показаны на рис. 41. Видно, что аккумулятор способен обрабатывать все переходные процессы, за исключением режима рекуперативного торможения, в ходе которого ток топливного элемента уменьшается. Ток батареи меняется приблизительно от -200 до 200 А; отметим, что у трехпоточковой схемы переходные процессы в аккумуляторе значительно меньше. Состояние его заряда (SoC) представлено на рис. 42.

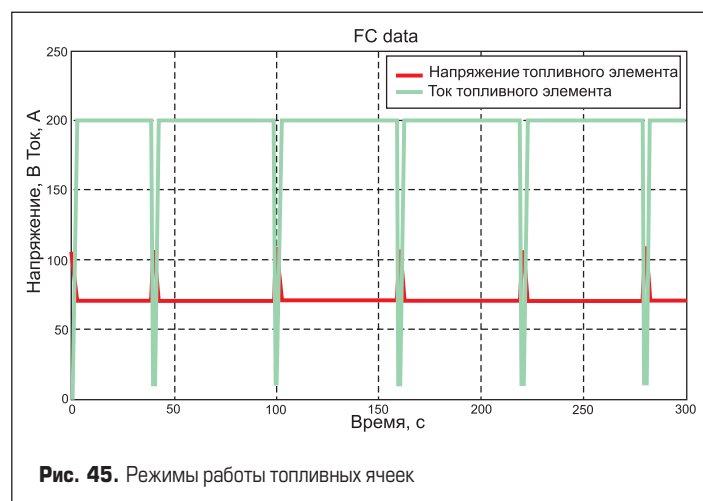
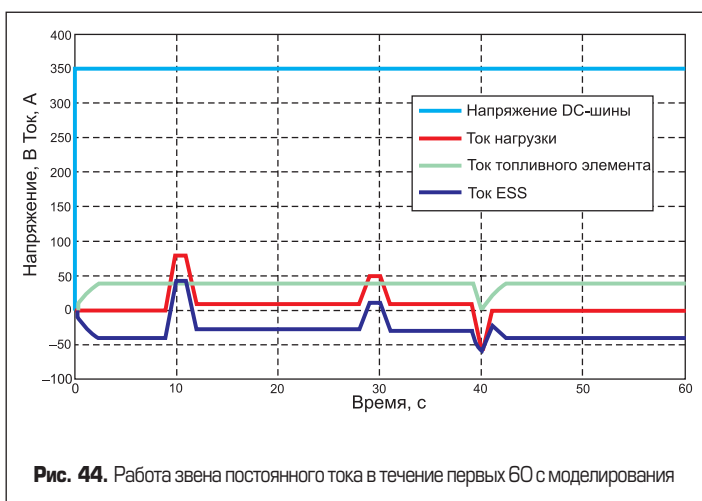
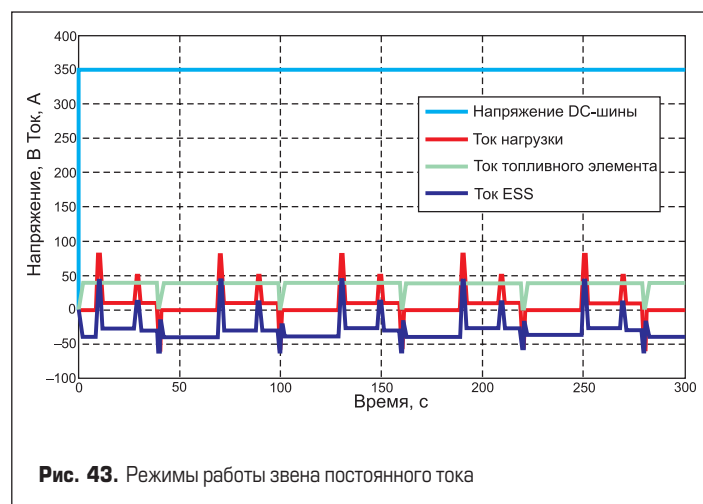
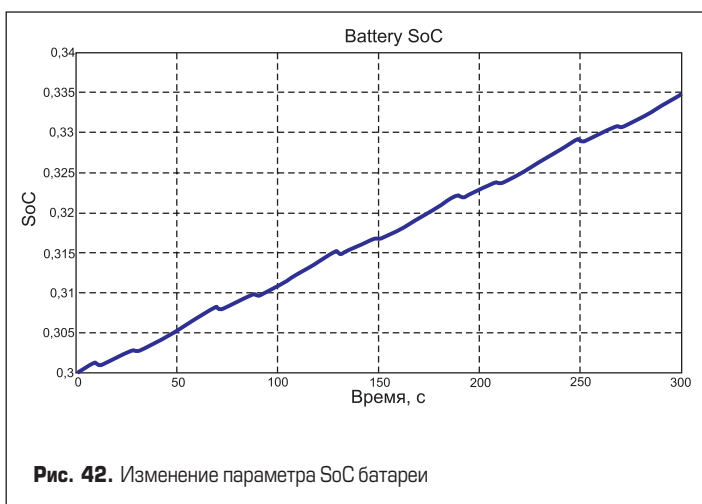
Любой дефицит или избыток мощности DC-шины компенсируется батареями. Рис. 42 показывает, что имеется избыточное количество энергии, вырабатываемой топливными элементами, и параметр SoC батареи меняется от 30% до примерно 33,5%

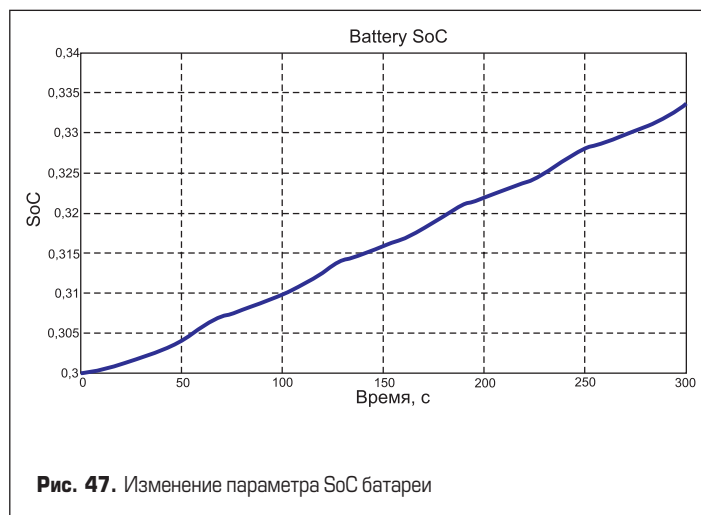
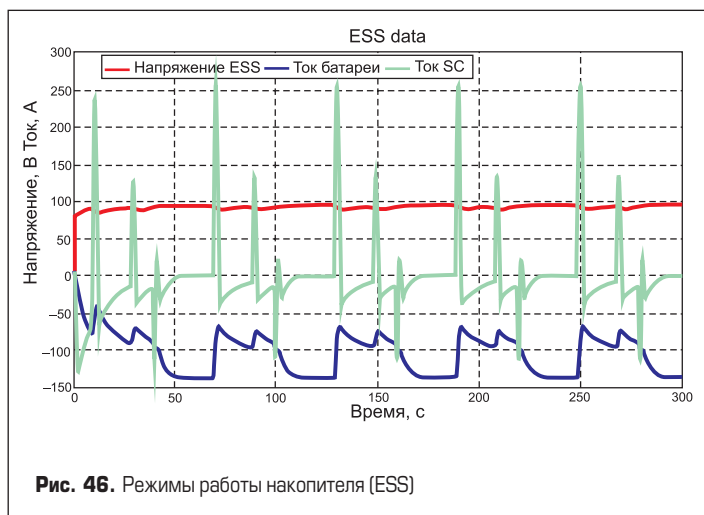
в течение 300 с моделирования. На практике для работы гибридной трансмиссии требуется схема контроля состояния заряда (SoC) аккумулятора.

### Трехпоточковый гибридный привод на топливных элементах

На рис. 43 показаны напряжения и токи DC-шины, они примерно такие же, как и у двухпоточковой трансмиссии. Более подробно результаты первых 60 с моделирования представлены на рис. 44.

Сравнение рис. 44 и 39 показывает, что добавление суперконденсатора параллельно батарее практически не влияет на состояние DC-шины. Режимы работы топливных ячеек представлены на рис. 45, они немного отличаются от показанных на рис. 40.





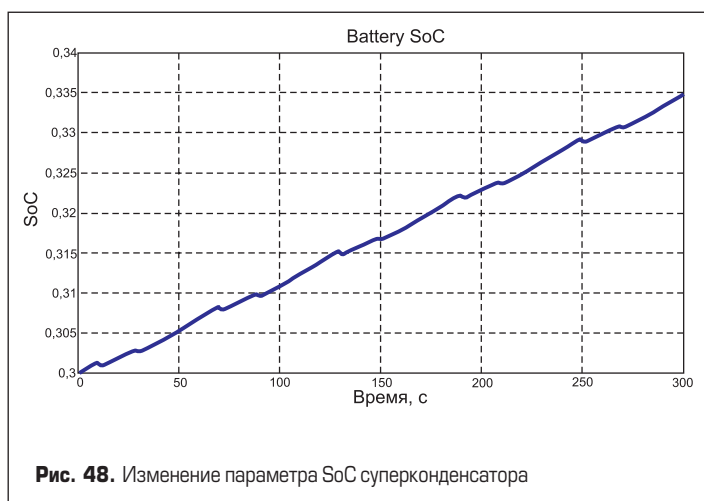
На рис. 46 приведены режимы работы накопителя энергии, состоящего из батареи и суперконденсатора. Анализ рис. 46 и 41 выявляет большую разницу между полученными результатами. В трех-потоковом приводе суперконденсатор обрабатывает большую часть переходных процессов, сглаживая пульсации тока батареи и напряжения ESS. Это оказывает положительное влияние на срок службы батареи, а также увеличивает эффективность процесса заряд/разряд в целом, поскольку суперконденсаторы обладают гораздо более высокой способностью к обработке динамических процессов, чем батареи. Токи четко распределены в соответствии с импедансами аккумулятора и суперконденсатора.

Состояние заряда батареи приведено на рис. 47: значение SoC увеличивается от 30% до приблизительно 33,5% в течение 300 с моделирования, так же, как и в двухпотоковой конфигурации.

На рис. 48 показано изменение заряда суперконденсатора. По рис. 48 и 47 видно, что баланс токов между аккумулятором и суперконденсатором достигается в течение первого рабочего цикла привода. После его окончания используется только примерно 10% SoC суперконденсатора. Если его разряд должен идти активнее, то суперконденсатор следует подключать через собственный DC/DC-преобразователь, что, однако, может создать дополнительные проблемы.

### Экспериментальные результаты, выводы и заключения

Моделирование показало очень хорошие результаты: напряжение DC-шины остается на номинальном уровне 350 В с незначительными отклонениями. Ток топливного элемента можно рассматривать как чистый DC (без учета пульсаций, создаваемых конвертером), он снижается и повышается во время рекуперативного торможения, оставаясь под контролем. К сожалению, достоверность модели



не проверялась, поэтому нет возможности оценить точность расчетов.

Топливный элемент может вырабатывать примерно 16 кВт энергии, тогда как накопитель ESS способен генерировать или аккумулировать около 23 кВт (в зависимости от SoC), его возможности связаны с ограничением входного тока двунаправленного преобразователя (250 А). Таким образом, в целом силовой агрегат выдает  $16 \text{ кВт} + 23 \text{ кВт} = 39 \text{ кВт}$  мощности и поглощает максимум 23 кВт, если ток топливного элемента поддерживается на нулевом уровне. С другой стороны, если он обеспечивает 16 кВт, то это ограничивает нагрузочную способность на уровне всего  $23 \text{ кВт} - 16 \text{ кВт} = 7 \text{ кВт}$ . Вот причина, по которой ток топливного элемента следует снижать во время рекуперативного торможения.

Уровни мощностей привода кажутся достаточно низкими по сравнению, например, с входным током конвертера  $-250 \text{ А}$ ; на практике реализовать такой преобразователь достаточно трудно. Кроме того, высокие токи означают большие потери, кабели большого сечения и крупногабаритные фильтры. Отсюда можно сделать вывод, что уровень напряжения источника энергии необходимо повышать, что позволит снизить токовые нагрузки до разумных значений. Например, напряжение батареи автомобиля Toyota Prius составляет 202 В [44].

Совершенно ясно, что выбор параметров компонентов гибридной трансмиссии имеет решающее значение при разработке конструкции. Моделирование показывает, что при максимальных нагрузках привод потребляет мощность и от топливных элементов, и от ESS. В конечном итоге это означает, что силовой агрегат не будет работать в системе, получающей питание только от накопителя энергии, до тех пор, пока его показатель SoC не упадет до определенного предела.

Пиковые значения мощности в режиме рекуперативного торможения на практике оказываются гораздо выше и, следовательно, от ESS или тормозного резистора требуется еще большая нагрузочная способность. Применение высоковольтных накопителей энергии с лучшими мощностными характеристиками позволяет решить эту проблему и упростить конструкцию преобразователя.

Трехпотоковая схема имеет ряд преимуществ по сравнению с двухпотоковой:

- Суперконденсаторы обеспечивают подавление переходных процессов, делая ток батареи более стабильным. Это положительно влияет на срок службы аккумуляторов, в первую очередь свинцово-кислотных [9].
- Суперконденсаторы имеют очень высокую пиковую нагрузочную способность, за счет чего они способны обрабатывать наиболее мощные переходные процессы. От аккумулятора не требуется высокая плотность мощности, что позволяет использовать батареи с более высокой удельной энергией и сроком службы.
- Суперконденсаторы обладают очень высокой эффективностью использования энергии, у свинцово-кислотных батарей она ниже

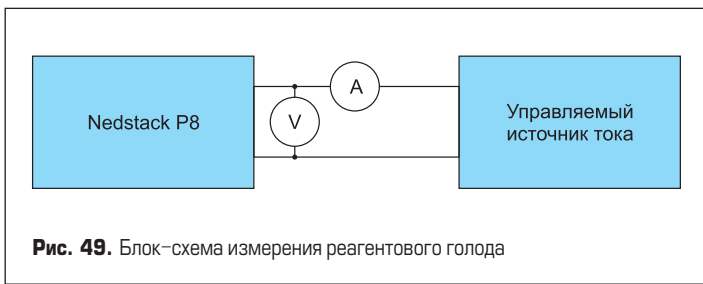


Рис. 49. Блок-схема измерения реagenтового голода

примерно на 40% [45]. Следовательно, включение суперконденсатора параллельно с аккумулятором позволяет увеличить общую энергоэффективность системы.

### Реагентное голодание

Анализ явления реagenтового голодания требуется для оценки необходимости ограничения скорости изменения выходного тока топливных элементов. Полученные результаты представлены в данном разделе, эксперимент проводился на топливных элементах Nedstack P8, которые могут обеспечивать мощность около 8 кВт, а их напряжение и ток находятся в диапазоне 36–48 В и 0–250 А соответственно. Режимы работы топливных элементов измерялись в условиях токовых переходных процессов на выходе.

На рис. 49 показана блок-схема испытаний, а на рис. 50 представлена фотография реальной экспериментальной установки, где можно увидеть измерительные устройства, топливный элемент и часть системы ВоР. Программируемый источник постоянного тока исключен для упрощения. Анализатор мощности Fluke Norma 4000 использован для измерений напряжения и тока топливного элемента, которые проводились при частоте дискретизации около 2,7 кГц. Нагрузка программировалась с учетом обеспечения переходных процессов с различной амплитудой. Первый тест проводился без ограничения скорости изменения тока, во втором она была лимитирована на уровне 400 А/с.

Перед воздействием переходных процессов топливный элемент разогревался до номинальной рабочей температуры. Измерение тока проводилось с помощью резистивного шунта (300 А, 60 мВ). В топливном элементе используется рециркуляция водорода, он имеет клапан продувки, который периодически открывается для сброса инертных газов, которые накапливаются с течением времени. Были приняты меры, чтобы клапан оставался закрытым в течение всего времени измерения, поскольку продувка влияет на напряжение топливного элемента.

### Результаты измерений

На рис. 51 представлены результаты анализа состояния реagenтового голодания без ограничения  $di/dt$ , реагентом в этом случае является

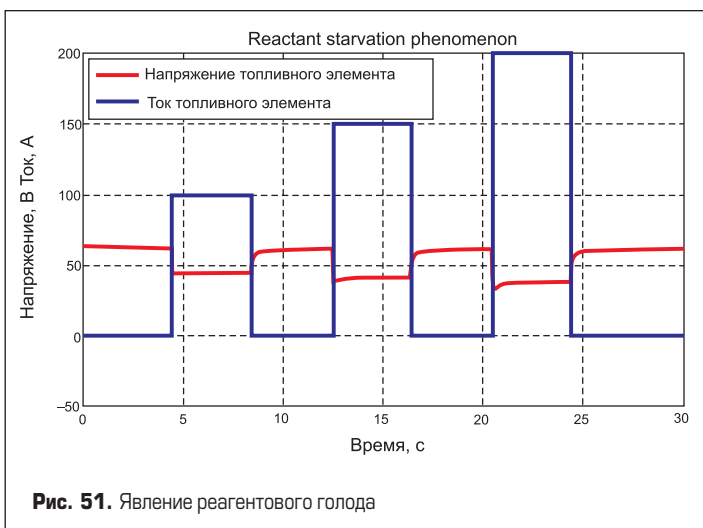


Рис. 51. Явление реagenтового голода

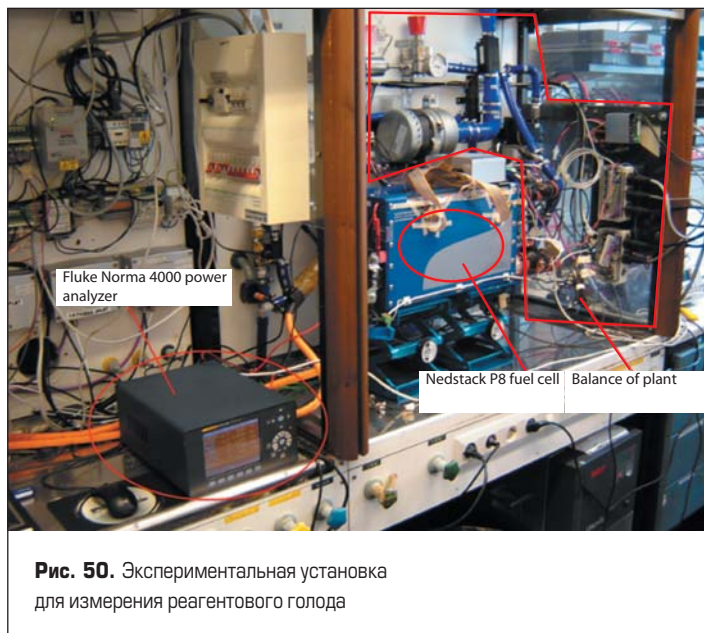


Рис. 50. Экспериментальная установка для измерения реagenтового голода

воздух. Водородное голодание было исключено благодаря длительной продувке перед измерением. Видно, что эффект реagenтового голодания лучше всего проявляется после воздействия переходного процесса 0–200 А. Кроме того, данное явление присутствует только во время положительных переходных процессов, т. е. ограничение скорости следует применять только для положительного направления тока. Соответственно, выходной ток топливного элемента может снижаться без всяких ограничений.

Воздействие переходного процесса (перепад тока 0–200 А) показано на рис. 52, где отчетливо проявляется явление реagenтового голодания. Оно создает дополнительное падение напряжения до тех пор, пока не начнется действие источника реагента, что позволяет поддерживать напряжение на некотором уровне. Видно, что оно снижается с 61,2 В до минимального значения 33,5 В, а затем стабилизируется на уровне 37,7 В.

Реагентное голодание оказывает очень негативное влияние на срок службы топливного элемента, как было объяснено ранее. Функция ограничения  $di/dt$  должна быть реализована в понижающем преобразователе таким образом, чтобы источник реагента был в состоянии компенсировать изменение нагрузки.

На рис. 53 представлен переходный процесс 0–200 А с лимитом скорости изменения тока 400 А/с. Видно, что явление реagenтового голода все еще наблюдается, однако минимальное напряжение здесь 34,1 В, т. е. на 60 мВ выше, чем в предыдущем случае. Кроме того, его спад идет гораздо медленнее. Дальнейшее ограничение  $di/dt$  может полностью подавить эффект реagenтового голодания. К сожалению, это не удалось проверить, поскольку особенности нагрузки

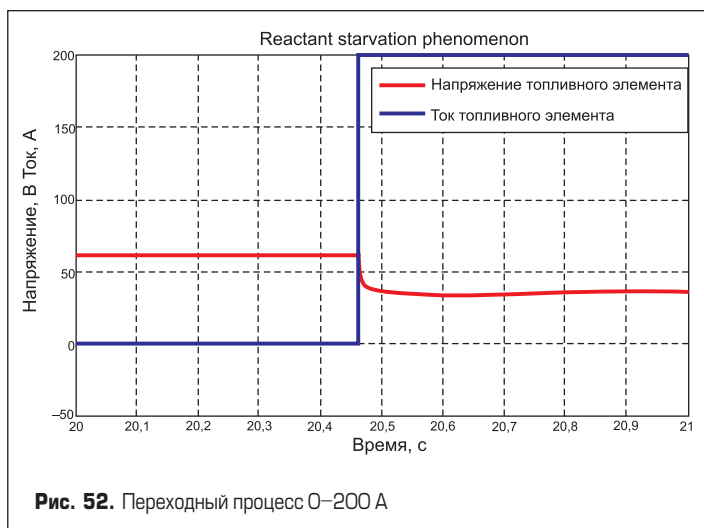
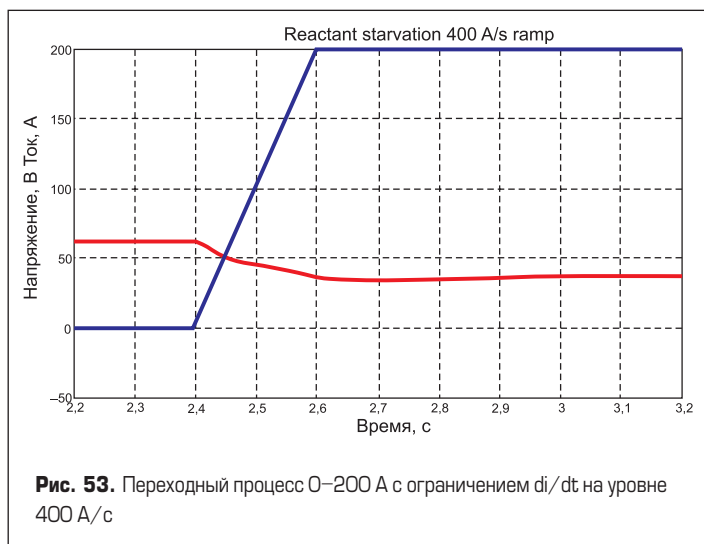


Рис. 52. Переходный процесс 0–200 А



не позволяют обеспечить скорость изменения тока ниже 400 А/с. Однако на основе опыта применения топливных элементов можно утверждать, что значения  $di/dt$  около 100 А/с должно быть достаточно для решения задачи.

### Заключение

Целью данной работы было исследование проблем силовой электроники в применении к гибридной трансмиссии на топливных элементах. Моделирование показало, что можно создать стабильно работающий гибридный привод при условии внимательного изучения широкого круга связанных с ним вопросов. Поскольку проверка корректности моделей не проводилась, необходимо проверить полученные результаты путем испытаний реального привода. Это также позволит изучить проблемы, связанные с его проектированием.

Полученные результаты показывают, что для построения правильно работающего гибридного силового агрегата необходимо рассмотреть следующие вопросы:

- выбор оптимальной конфигурации привода;
- определение параметров источников энергии на основе профиля нагрузки;
- выбор надлежащих уровней напряжения;
- выбор оптимальной топологии DC/DC-конвертера;
- тщательная проработка контура управления преобразователем;
- определение оптимальной стратегии управления энергетическими потоками.

Очевидно, что практическая реализация привода создаст дополнительные проблемы, которые должны быть проанализированы и решены.

Применение силовой электроники в гибридной трансмиссии на топливных элементах — это очень широкая тема. В данной работе рассмотрена только малая часть вопросов, которые должны быть приняты во внимание при разработке подобных устройств. Одной из задач, которые не обсуждались в рамках статьи, является масштабируемость привода. Отметим, что это очень важный аспект, позволяющий использовать одни и те же решения и блоки для разработки силовых агрегатов для разных уровней мощности. С точки зрения силовой электроники, снижение мощности не является проблемой, однако ее наращивание может столкнуться с совершенно неожиданными трудностями.

Моделирование показывает, что лучше всего увеличивать мощность за счет роста напряжения источников энергии. К сожалению, это возможно только до определенного предела, поэтому в конечном итоге все равно приходится наращивать, для чего существует возможность параллельного включения конвертеров и силовых модулей, а также использования режима интерливинга. Преимуществом такого решения является повышение надежности привода, поскольку его работоспособность может сохраняться при выходе из строя одного или нескольких параллельных звеньев.

### Литература

39. Junhong Zhang, Rae-young Kim & Jih-Sheng Lai. High-Power Density Design of a Soft-Switching High-Power Bidirectional DC-DC Converter. Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE. 2006.
40. Averbeg A. & Mertens, A. Design considerations of a voltage-fed full bridge DC-DC converter with high voltage gain for fuel cell applications. Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on. 2007.
41. Jih-Sheng Lai & Nelson D. J. Energy Management Power Converters in Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles. Proceedings of the IEEE 2007, Vol. 95, No. 4.
42. Suntio T. Dynamic Profile of Switched-Mode Converter: Modeling, Analysis and Control. WILEY-VCH, 2009.
43. Jung-Min Kwon, Eung-Ho Kim, Bong-Hwan Kwon & Kwang-Hee Nam. High-Efficiency Fuel Cell Power Conditioning System With Input Current Ripple Reduction. Industrial Electronics, IEEE Transactions on 2009, Vol. 56, No. 3.
44. Toyota Toyota Prius eBrochure. [www.toyota.com/prius-hybrid/specs.html](http://www.toyota.com/prius-hybrid/specs.html).
45. Hua A. C. & Syue B. Z. Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and  $\text{LiFePO}_4$  battery. Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International. 2010.