

16-я конференция по силовой электронике

Валерий Мелешин

Очередная, 16-я Международная конференция по силовой электронике (СЭ) и управлению движением (РЕМС 2014) состоялась 21–24 сентября 2014 г. в Анталии (Турция). Это стало крупнейшим событием для специалистов, работающих в различных областях силовой электроники. В дальнейшем она будет проводиться в четные годы в европейских странах. Председатель конференции — профессор Илшам Чолак (Ilhami Colak), JRC, Нидерланды. Цель РЕМС — собрать вместе со всего мира исследователей, инженеров и специалистов, занимающихся практическими вопросами и заинтересованных в продвижении систем энергетики, силовой электроники, электроприводов и прогрессе образования. Оргкомитетом было получено 475 работ, из них принято 253. На лекционных сессиях освещены 194 работы, по 59 были сделаны сообщения на диалоговых сессиях. На конференции рассматривалось следующее:

- Полупроводниковые устройства, а также упаковка и вопросы интегрирования конструкций.
- Топологии и разработка преобразователей СЭ.
- Управление преобразователями.
- Электрические машины и приводы.
- Робототехника, управление движением и регулируемые приводы.
- Источники питания.

- Технология проведения измерений и наблюдений, датчики.
- Применение СЭ в дорожных транспортных средствах.
- СЭ в технологиях построения микросетей, их применениях, вопросы стратегии.
- СЭ в технологиях построения больших сетей, их применениях, вопросы стратегии.
- СЭ в технологиях построения Smart Grid, их применениях, вопросы стратегии.
- СЭ в аэрокосмических, морских и транспортных приложениях.
- СЭ в системах передачи и распределения электроэнергии.
- СЭ в системах традиционной и возобновляемой генерации электроэнергии.

На конференции прозвучало несколько ключевых докладов. Профессор Фред Ли (Fred C. Lee) из университета Виржинии, основатель и директор Центра систем силовой электроники (CPES), выдающейся организации, известной во всем мире. Как директор CPES, Ф. Ли возглавляет программы исследований развития и передачи технологий, образовательного направления, связи с промышленностью. Он сделал доклад под названием «Можно ли считать, что GaN полностью меняет изделие?». Устройства на основе GaN являются мощной движущей силой для последних нововведений на рынке и таких приложений, как преобразователи, располагаемые рядом с нагрузкой (POL), офлайн ключевые источники питания, зарядные устройства аккумуляторных батарей и приводы.

Приборы на основе GaN имеют гораздо меньший заряд затвора и меньшее значение выходной емкости, а значит, способны работать на значительно более высоких частотах переключения, чем это принято для кремниевых приборов (MOSFET). В результате может значительно возрасти удельная мощность (power density) устройств, улучшится форм-фактор, изменятся конструктивные решения и даже производственные процессы при изготовлении изделий. Чтобы реализовать преимущества, обеспечиваемые значительным повышением рабочей частоты, необходимо подобрать топологию преобразователя и магнитных материалов, построить систему управления, разработать конструктивное решение изделия и произвести термоконтроль. Паразитные параметры, связанные с конструкцией изделия и разводкой схемы, должны быть минимизированы, причем не-



обходимо найти меры, предотвращающие нежелательные воздействия высоких значений dv/dt и di/dt . В докладе Ли было представлено несколько примеров конструкций преобразователей, включающих GaN-приборы, такие как PQL-преобразователь (5 МГц), преобразователи 48/12 В и 400/12 В (1,6 МГц). Показано, что удалось достичь значительного увеличения КПД и удельной мощности преобразователей.

Профессор Хирофуми Акаги (Hiroyfumi Akagi), представляющий инженерную школу Токийского института технологии, работает на кафедре электро- и электронной техники. В течение 2007 и 2008 гг. он был президентом Общества силовой электроники (Power Electronics Society) IEEE. Его доклад «Новые направления в силовой электронике для устройств и систем большой мощности» был посвящен схемным решениям, построению систем управления и применению многоуровневых каскадных преобразователей, подключаемых к высоковольтной сети, а также приводам большой мощности при среднем уровне напряжения. Были представлены результаты экспериментов, проведенных с несколькими различными системами, разработанными и сконструированными в лаборатории докладчика. Причем особое внимание было обращено на двунаправленный изолированный DC/DC-преобразователь, в котором применены новые 400-А SiC-MOSFET/SBD-модули на 1,2 кВ, а также приведены такие важнейшие параметры устройств, как КПД и значение потерь. Акаги отметил, что специалисты, работающие в области СЭ для устройств большой мощности, в настоящее время совершают переход от кремниевой планеты к планете карбида кремния, который займет около пяти лет.

В докладе профессора Эрика Монмассона (Eric Monmasson) из университета де Сержи-Понтуаз (Cergy-Pontoise), Франция, рассматриваются цифровые компоненты и связанные с ними инструменты разработки, которые непрерывно совершенствуются как в своих технических характеристиках, так и в возможностях построения систем, отвечающих требованиям большой гибкости. Профессор также работает в лаборатории SATLE UMR CNRS8029. Его интересы как исследователя включают новые методы управления электрическими машинами и построение встроенных цифровых систем управления. В своем выступлении он отметил, что компоненты нынешнего дня предлагают новые возможности разработчику, например создание мультипроцессорной системы на одном кристалле (MPSoC). Также он подчеркнул, что среди различных доступных и реализуемых инструментов FPGA является одним из наиболее многообещающих для применения в СЭ как в настоящее время, так и в будущем. В докладе были представлены контроллеры на основе FPGA для СЭ и привода переменного тока. Показано, как быстродействие и гибкость FPGA помогают значительно улучшить основные параметры управляемых систем. Особое внимание было уделено встроенным приложениям с повышенными требованиями (например, рекомендации для при-

менения в авиации), а также проведено сравнение систем с FPGA и стандартно выполняемых на DSP. Наряду с выводами докладчик обосновал будущие направления развития, такие как построение контроллера на одном кристалле, встроенные системы моделирования в реальном времени и адаптивные контроллеры.

Образовательный семинар (tutorial), проведенный в первый рабочий день конференции, был посвящен работе преобразователей с новыми силовыми приборами. Было отмечено, что силовая электроника и преобразователи играют значительную роль в промышленных приложениях, в производстве и передаче электроэнергии, домашних электроприборах, транспортных средствах и т. д. и т. п. Без СЭ наша жизнь сегодня сильно бы отличалась в худшую сторону. СЭ и особенно мощные полупроводниковые приборы улучшаются практически ежедневно. Каждое новое поколение мощных приборов создает новые проблемы, требующие решений, причем некоторые из них не позволяют полностью использовать все преимущества новых приборов. К двум таким относятся высокие значения di/dt и dv/dt , которые в сочетании с паразитными индуктивностями и емкостями прибора, а также самого преобразователя создают пере-напряжения, способствуют повышению уровня излучаемых и передающихся по проводам помех (EMI), ухудшают изоляцию нагрузок. Необходимо изучить и вопросы сборки новых приборов в корпусе. Можно ли их решить, применяя новые корпуса, или нужно предпринимать что-то еще, более существенное?

От России на конференции были представлены семь докладов и одно сообщение.

- Доклад «Управление индукционным генератором, работающим в одиночном режиме, на основе контроллера пространства состояний» был представлен С. Рывкиным (Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН), М. Валныевым (Национальный исследовательский университет «МЭИ»), а также С. Флиглом и Дж. Бауэр (S. Fligl, J. Bauer),

оба из Чешского технического университета, Прага.

- Доклад «Многофункциональный контроллер качества электроэнергии на основе силового преобразователя» выполнен Ю. Розановым, М. Лепановым, М. Киселевым из Национального исследовательского университета «МЭИ».
- Доклад «Разработка vernie-электрогенератора на постоянных магнитах и силового преобразователя для использования в волновых электростанциях» составлен К. Крюковым, П. Курбатовым и О. Молокановым из Национального исследовательского университета «МЭИ».
- Доклад «Активный фильтр с общей DC-шиной для компенсации гармонических искажений в силовых цепях» был выполнен М. Хабибулиным, В. Пикаловым, В. Мещеряковым из Липецкого государственного технического университета, а также Станимиром Вальчевым (S. Valtchev) из Лиссабонского университета, Португалия.
- Доклад «Анализ циркулирующих с частотой переключения токов в параллельно соединенных многоуровневых NPC-инверторах» представлен М. Дыбко и С. Бровановым из Новосибирского государственного технического университета.
- Доклад «Вспомогательный преобразователь для железной дороги на базе модулей IGBT 6,5 кВ, работающий от контактной линии 3 кВ» представлен В. Мелешиним, Д. Жикленковым, С. Сачковым и А. Ганьшиным из ЗАО «Электро СИ», Москва.
- Доклад «Новый вспомогательный преобразователь для железной дороги» выполнен В. Мелешиним, С. Хухтиковым, А. Точеновым из ЗАО «Электро СИ», Москва.
- Сообщение «О мощности потерь в ключевых схемах с суперконденсаторами» сделано Ф. Букашевым (Государственный университет им. Я. Мудрого, г. Великий Новгород) и А. Кушнеровым (А. Kushnerov) из Университета им. Бен-Гуриона, Израиль.





Отметим еще несколько работ, представленных на конференции. В докладе «Высокоэффективное цифровое управление ключевым источником питания», выполненном Ф. Курокава и Дж. Фурукама (F. Kurokawa и J. Furukawa) из Университета Нагасаки, представлен метод цифрового управления, подавляющий временную задержку ключевого источника. Обычно такая задержка обусловлена временем преобразования A/D-конвертера, а также конечным временем расчета при цифровом управлении. Все это вызывает ухудшение переходного процесса и приводит к неустойчивости системы. Предлагаемый метод подавляет временную задержку. Результаты показывают, что он может эффективно улучшить переходный процесс, уменьшая колебательность и сокращая его время.

С. д'Арко (S. D'Arco) из Центра исследования энергии SINTEF, а также Дж. Сул и М. Молинас (J. Suul и M. Molinas) из Норвежского университета науки и технологии, г. Тронхейм, составили доклад «Анализ и реализация управляющей схемы подавления колебаний в высоковольтных сетях постоянного тока, выполненных с применением преобразователей напряжения». В нем был предложен простой метод подавления колебаний в сетях постоянного тока, основанных на преобразователях напряжения (Voltage Source Converters — VSCs). Подавление достигается построением контура управления, противодействующего колебаниям, измеряемым на стороне постоянного тока (DC), и воздействием на опорный сигнал активной составляющей тока на стороне переменного тока (AC) контроллера VSC. Создана малосигнальная модель для проведения исследований и симуляции системы. Опытная система состоит из одиночной конвертерной станции, преобразующей высокое напряжение постоянного тока (HVDC) и подключенной к эквиваленту кабеля на стороне DC, а с другой стороны — к сети AC. Малосигнальная модель затем используется для анализа устойчивости и динамических характеристик, как с предложенным активным подавлением, так и без него, а кроме того, для внесения необходимых настроек в контроллер.

В работе «Управление двунаправленным потоком мощности в гибридной энергосистеме «батарея–суперконденсатор» для автомобилей со встроенными в колесо двигателями», представленной Сяо Лян Сун Хе (Xiaoliang Sunney Xie), Х. Йоши (H. Yoichi) и Х. Тосиюки (H. Tosiyoiki) из Токийского университета, показано, что улучшение характеристик электромобиля (ЭМ) может быть достигнуто с помощью гибридной накопительной системы, включающей в себя суперконденсаторы (СК) и аккумуляторную батарею (АБ). В результате применения такой системы (HESS) повышается удельная мощность энергосистемы. Цель построения двунаправленной системы заключается в том, чтобы удовлетворять требованиям получения высоких технических характеристик в системе со встроенным в колесо двигателем, а также выполнить возврат энергии при торможении. В работе тщательно анализируются топологии конвертеров для различных подключений модуля СК. В организации двунаправленной передачи энергии используется токовое управление. Система HESS может работать в четырех режимах.

- **Нормальный:** СК и АБ обеспечивают энергией нагрузку, следуя директивам системы менеджмента энергосистемы.
- **Режим заряда:** конденсатор находится на низком уровне заряда. Для подтверждения продолжения работы система заряжает СК от АБ или от системы регенерации энергии от нагрузок.
- **Режим регенерации:** двигатель возвращает энергию, которая направляется в устройство ее хранения.
- **Режим неисправности:** не работает один из источников электроэнергии (СК или АБ) или происходит режим перегрузки. Экспериментальная установка, функционирующая на малой мощности, и результаты, полученные на ней, показали эффективность метода управления.

Большая группа авторов из Южной Кореи представила доклад «Анализ LLC резонансного преобразователя с выпрямителем, выполненным в виде удвоителя тока (current doubler rectifier)». Интересная выпрямительная схема,

называемая «удвоителем тока», давно применяется в различных топологиях преобразователей. Такой выпрямитель позволяет уменьшить размеры силового трансформатора, поскольку нет вывода средней точки вторичной обмотки, позволяет добиться понижения высоты конструкции, поскольку вместо одного объемного дросселя применяются два меньшего размера. Однако в популярном LLC-преобразователе, где во вторичную обмотку посылается ток, индуктивный элемент фильтра нарушает резонансный процесс. Тем не менее авторы показывают, что если две требуемые индуктивности «удвоителя тока» выполнены на одном сердечнике с хорошей индуктивной связью между ними, все основные процессы в LLC-преобразователе сохраняются. Моделирование и эксперимент подтвердили проведенный анализ.

Интересно сравнить по некоторым показателям две недавние крупные европейские конференции, проводившиеся в Финляндии (EPE'14) и Турции (PEMC 2014). Прежде всего, необходимо сравнить уровни докладов и сообщений. На обеих конференциях были представлены интересные доклады, включая основные, и все-таки представляется, что в Финляндии доклады были глубже и разнообразнее по тематике. Участников было примерно равное количество, но организаторы поступили по-разному с принятыми работами. Если в Финляндии было небольшое число докладов и много стендовых (диалоговых) сообщений, то в Турции, наоборот, число стендовых сообщений было небольшим. Но нельзя дать однозначный ответ, что же лучше для участников конференции. Отсутствие выставки на конференции в Турции является ее серьезным недостатком, в то время как довольно маленькая выставка в Финляндии вызвала большой интерес участников. На ней были показаны новейшие образцы GaN-приборов, а также новое силовое электронное оборудование для экскаваторов, погрузчиков и других механизмов. Важным вопросом является стоимость участия, поскольку без оплаты даже положительное оцененные рецензентами работы не публикуются в трудах конференции. Конференция PEMC с этой точки зрения более приемлемая, поскольку взнос для участия в ней существенно ниже, и, кроме того, для ряда стран, включая Россию, существует дополнительная скидка.

В обеих конференциях участвовали видные исследователи, которые внесли существенный вклад в развитие СЭ. Чтобы не называть большое число фамилий, отметим только участие Владимира Катича (Vladimir Katic), EPE'14 (Нови-Садский университет, Сербия), Иштвана Нады (Istvan Nagy), PEMC 2014 (Будапештский университет технологии и экономики, Венгрия), Фреда Ли (Fred Lee), PEMC 2014 (США, Университет Виржинии).

Обе конференции были хорошо организованы, особенно EPE'14, где, например, были проведены интересные технические экскурсии по Технологическому университету г. Лапезантанта. Отсутствие выставки, одновременное проведение лекционных секций и образовательного семинара — ощутимые недостатки конференции PEMC 2014.