

# Энергия, принесенная ветром

Годовой прирост энергии, получаемой в последнее время в Европе от ветроэнергетических установок (ВЭУ), превышает 30%. Столь мощный подъем происходит за счет увеличения количества подобных установок и роста их мощности. Стремительное развитие технологий производства полупроводников, снижение уровня потерь силовых ключей и повышение их эффективности, появление новых средств моделирования и проектирования позволяет создавать преобразователи ветротурбин с уникальными технико-экономическими показателями.

Увеличение плотности мощности силовых ключей и постоянное стремление к снижению массогабаритных показателей делает разработку конструкции силовых преобразователей одним из самых сложных этапов проектирования. Это в полной мере относится к конвертерам ветротурбин — одним из самых энергонасыщенных изделий силовой электроники.

Общие принципы проектирования ветроэнергетических установок в принципе применимы ко всем изделиям силовой электроники, поэтому на примере преобразователей ВЭУ можно проследить основные тенденции ее развития.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

## Интеграция силовых преобразовательных устройств

Повышение эффективности и снижение габаритов преобразовательного устройства может происходить за счет увеличения степени интеграции. В области мощных преобразователей данное понятие имеет несколько уровней, показанных на рис. 1. Приведенные на рисунке стадии интеграции не являются специфическими для ветроэнергетики, все они в какой-то мере относятся и к другим отраслям силовой электроники. Каждый из сегментов представляет собой специфическую область, в которой проводятся соответствующие исследования и существуют свои компании-лидеры. Соответственно, ключом к успешному созданию конкурентоспособного изделия становится правильный выбор партнера на всех стадиях разработки.

Производитель ветроэнергетической установки, как «конечный интегратор», может приобрести силовые модули и самостоятельно провести все этапы проектирования, а также купить готовую сборку силового каскада или полную, конструктивно законченную стойку. Доверяя какой-либо из этапов проектирования партнеру, производитель готового изделия неизбежно затрачивает дополнительные средства, однако при этом экономит время, получает профессионально спроектированный и протестированный блок и имеет возможность полностью сосредоточиться на своей части работы. Кроме того, правильно выбранный партнер, обладающий большим опытом в проектировании специализированных продуктов, наверняка выполнит полученное задание быстрее и качественнее. Примером отлично продуманной вертикальной и горизонтальной интеграции усилий может служить автоиндустрия, где никто из крупнейших автопроизводителей не занимается разработкой всех узлов автомобиля, а поручает эту работу опытным контрагентам.

## История и тенденции

Ветроэнергетическая установка конструктивно состоит из ветроколеса с лопастями, повышающего редуктора и генератора (мотор/генератора), которые устанавливаются на мачте, и электронного блока (инвертора). Для большей надежности в состав автономной системы электроснабжения иногда включают блоки солнечных батарей, бензиновый или дизельный электроагрегат и аккумулятор.

Принцип действия ветрогенератора таков: сила ветра вращает ветроколесо с лопастями, передавая крутящий момент через редуктор на вал генератора. Таким образом реализуется принцип превращения механической энергии в электрическую. Мощность



ветрогенератора зависит от размеров ветроколеса, скорости ветра, а также высоты мачты. Выпускаемые в настоящий момент ветрогенераторы имеют диаметр лопастей от 0,75 до 80 и более метров. Инвертор представляет собой электронный блок, который выполняет формирование синусоидального выходного напряжения и его стабилизацию. Аккумулятор заряжается при номинальном режиме работы ВЭУ и подпитывает инвертор при отсутствии ветра.

В простейших ВЭУ, называемых генераторами с постоянной скоростью, передаточное число редуктора выбирается так, чтобы генератор вращался на частоте, немного превышающей синхронную. В таких установках обычно применяются классические схемы статических тиристорных коммутаторов. Подобные простые и надежные конструкции ветрогенераторов и преобразователей широко использовались вплоть до 1995 года.

Энергетический кризис и глобальные проблемы с утилизацией отходов вызвали новый всплеск интереса к ветроэнергетике. Практически все западные государства начали инвестировать значительные средства в разработку и производство ВЭУ — экологически чистых источников электроэнергии. В отличие от горючих энергоносителей, запасы ветра на планете неисчерпаемы, кроме того, ветроэлектростанции не нарушают экологический баланс, а для тепловых- и гидроэлектростанций этот вопрос стоит достаточно остро. Мы не упоминаем экологические проблемы, связанные с утилизацией отходов АЭС.

В последние несколько лет, ввиду все более обостряющегося топливно-энергетического кризиса, развитие альтернативной энергетики получило дополнительный толчок. В Западной Европе, Америке и Японии уже созданы и уверенно развиваются при поддержке государства ассоциации альтернативной энергетики. Там разработаны и функционируют ветроэнергетические установки мощностью 1,5 МВт и более. Электроэнергия, вырабатываемая с помощью ВЭУ, в таких странах, как Бельгия и Дания, удовлетворяет значительную часть общей государственной потребности.

В конце 2001 года суммарная мощность ветроэнергетических установок, действующих в Европе, превысила 10 000 МВт. Прогнозируется, что мощность европейских ВЭУ достигнет к 2010 году 40 000 МВт, а к 2020 году — 100 000 МВт. По подсчетам специалистов стоимость выработки 1 кВт мощности традиционной ВЭУ с ветроколесом при условии решения технических проблем должна быть ниже, чем стоимость 1 кВт тепловой или атомной энергии. Эта разница оказывается еще более существенной, если учесть экологическую чистоту и безотходность ветроэнергетики.

В 2001 году наименьшая себестоимость производства электроэнергии на ветроэнергетической установке составила 3,61 цента США за 1 кВт·ч при стоимости 1 кВт установленной мощности \$765. Принимая во внимание увеличение средней мощности ВЭУ и повышение коэффициента использования

Таблица 1. Сравнительные характеристики различных типов ВЭУ

Тип генератора	Преимущества	Недостатки	Основные производители
Асинхронный с постоянной скоростью. Преобразователь — 3-фазный управляемый выпрямитель	Простая и надежная тиристорная схема. Высокая эффективность преобразования.	Плохая управляемость, ограничивающая область применения. Могут использоваться только на частотах вращения выше синхронной.	NEG Micon, Vestas, Bonus, Nordex, Ecotecnia...
Асинхронный с переменной скоростью и двойным преобразованием (асинхронный мотор/генератор с токосъемниками и фазным ротором). Преобразователь — 3-фазный конвертер/инвертор	Преобразователь работает с частью тока генератора — меньше рассеиваемая мощность. Относительно хорошая управляемость (при использовании IGBT). Высокая эффективность преобразования (>99%).	Сложная конструкция генератора. Конвертер и инвертор работают независимо, но заметно влияют друг на друга из-за общей DC-шины. Для наращивания мощности требуется параллельное соединение инверторов.	General Electric Wind, Nordex, DeWind, NEG Micon, RePower, Vestas
Синхронный с переменной скоростью и прямым управлением	Простая конструкция и алгоритмы управления. Отличная управляемость (при использовании IGBT). Возможность работы без редуктора.	Конвертер работает при полном токе генератора, эффективность не превышает 96–98%.	Enercon, Lagerwey

мощности, к 2010 году можно ожидать снижения себестоимости производства 1 кВт·ч электроэнергии до 2,62 цента США (при стоимости 1 кВт установленной мощности \$555), а к 2020 году — до 2,11 цента США (при стоимости 1 кВт установленной мощности до \$447).

Растущие требования по увеличению мощности ВЭУ привели к разработке нового типа ветрогенераторов с переменной скоростью вращения (VSWT — Variable Speed Wind Turbine). 75% ветряков, выпущенных в 2001 году, и более 80%, выпущенных в 2002 году, используют данный принцип преобразования энергии ветра в электрическую. Современные береговые (офшорные) ветроэлектростанции мощностью 0,5–2 ГВт состоят в основном из ветрогенераторов с переменной скоростью.

Популярность такого типа ветряков обусловлена более высокой эффективностью использования энергии ветра. Подобные установки способны вырабатывать электроэнергию при больших диапазонах изменения скорости потока воздуха. С ростом скорости ветра выходная мощность генератора увеличивается. Электронная схема инвертора, обслуживающего генератор VSWT, оказывается несколько сложнее, чем у классического генератора с постоянной скоростью, но это компенсируется прибавкой более чем 10% мощности. Впервые преобразователь для генератора с переменной скоростью был предложен фирмой Lagerwey в 1990-е годы, а окончательное решение было найдено в 1995 году компанией TASCHE. Стандартная схема современной ВЭУ включает асинхронный мотор/генератор с фазным ротором, управляемый 4-квadrантным реверсивным конвертером. Сравнительные характеристики основных типов ветрогенераторов и силовых преобразователей приведены в таблице 1.

Современные исследования, проводимые с целью улучшения ремонтпригодности, повышения эффективности и надежности ВЭУ, сфокусированы на использовании синхронных мотор/генераторов с постоянными магнитами, способных работать в режиме прямого управления без редуктора. Подобные разработки предназначены прежде всего для установок высокой мощности (> 5 МВт),

использующих береговой ветер (offshore windmill).

При проектировании преобразователя ветротурбины разработчик должен учесть, что все решения, применяемые в ветроэнергетике, основаны в первую очередь на прагматизме. Любая аппаратура, предназначенная для ветротурбин, должна быть необслуживаемой в течение длительного времени, иметь высшие показатели надежности. Условия эксплуатации компонентов ветротурбин соизмеримы с условиями эксплуатации на транспорте и являются одними из наиболее жестких.

К ветрогенераторам, работающим в составе глобальных энергетических систем, предъявляются чрезвычайно высокие требования, соблюдение которых контролируется международными организациями, такими как UCTE (Union for the Coordination of Transmission of Electricity). Сеть UCTE представляет интересы операторов магистральных систем электропередачи в 20 европейских странах, ее основная задача — безопасное функционирование объединенных энергосистем. Ежегодное потребление электроэнергии в сетях UCTE составляет около 2100 ТВт·ч. Данной организацией выработаны требования к режимам работы ветряков, и с 1 января 2002 года ни одна ВЭУ, не удовлетворяющая данным требованиям, не может быть подключена к сети.

### Компоненты и технологии

В последние годы отмечено значительное усовершенствование технологий производства кристаллов IGBT, снижение уровня потерь, повышение допустимых значений плотности тока. Применительно к ветроэнергетике нас прежде всего интересуют силовые ключи с рабочим напряжением 1700 В, предназначенные для работы в сетях с напряжением до 690 В.

Проблема выбора силового модуля состоит не только в нахождении компонента с оптимальными для данного применения техническими характеристиками. В настоящее время рынок предлагает силовые элементы, имеющие все более высокий уровень интеграции (рис. 1). Разработчик может использовать

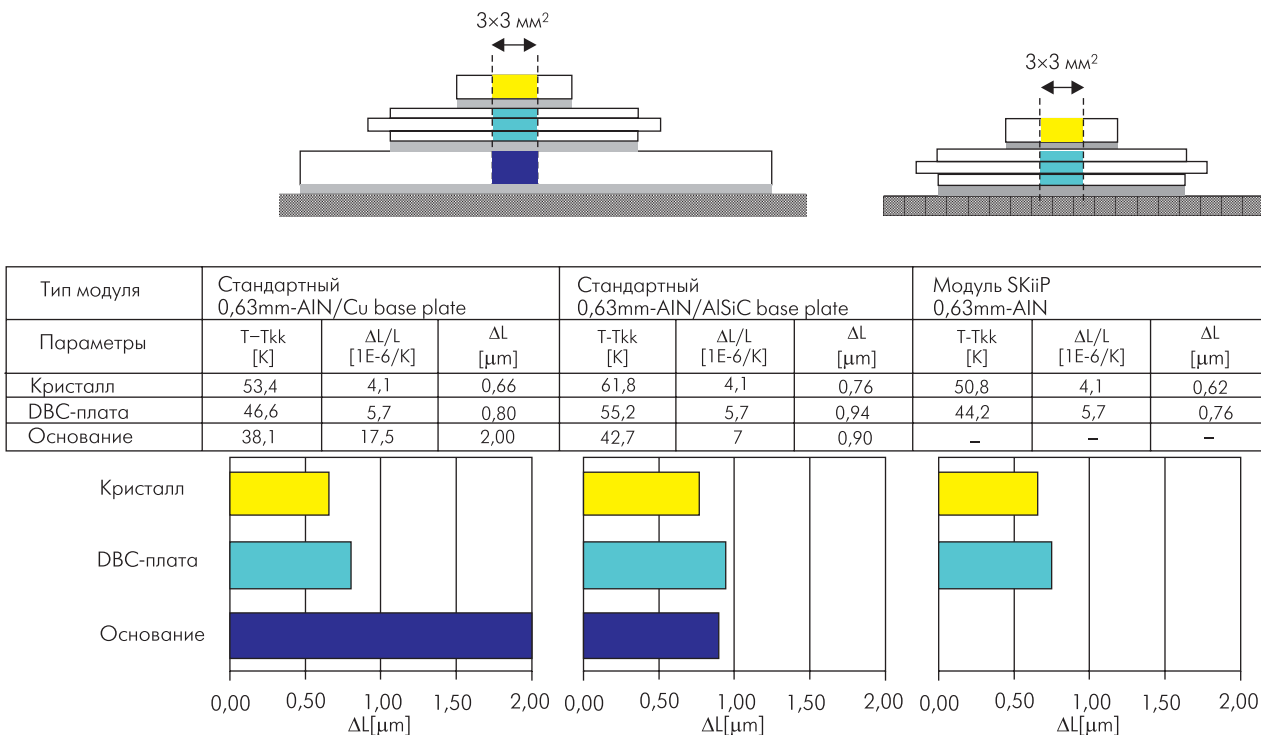


Рис. 2. Разность температур и линейные перемещения конструктивных элементов модулей

в своем проекте стандартный IGBT-модуль или «интеллектуальный» модуль со встроенными драйверами. Или сделать выбор может быть сделан в пользу полностью законченного компонента с максимальным уровнем «интеллектуализации», такого, как модуль SKiiP SEMIKRON, содержащий не только силовые ключи с платами управления, но и изолированный интерфейс, изолированный источник питания, а также датчики тока, температуры, напряжения шины питания. Естественно, подобное решение при прочих равных условиях оказывается надежнее, функциональнее, эффективнее, компактнее, хотя и дороже набора дискретных элементов, предназначенных для решения той же задачи. Очевидно, для столь сложного изделия, как ветрогенератор, выбор должен быть сделан в пользу наиболее функционально законченного компонента, обеспечивающего несоизмеримо более высокие показатели надежности.

Надежность работы модулей SKiiP, не имеющих медной базовой платы и выполненных по технологии прижимного контакта, обеспечивается их высокой стойкостью к термоциклированию — воздействию периодически повторяющихся импульсов мощности. Поскольку скорость ветра постоянно изменяется, кристаллы силовых модулей преобразователя находятся в регулярном режиме «нагрев-охлаждение», причем период термоцикла в этом случае оказывается достаточно малым. В результате конструкция модуля подвергается непрерывному термомеханическому стрессу.

Как показали многочисленные исследования, основной причиной отказов силовых модулей является именно рассогласование коэффициентов теплового расширения CTE (Coefficient of Thermal Expansion) конструктивных материалов. Разность коэффициен-

тов CTE алюминиевых соединительных выводов кристаллов и медных шин связи составляет CTEAL-Cu = 19,5; разность CTE медной базовой платы и керамической DBC-пластины, на которой установлены силовые чипы, CTEDBC-Cu = 10,8. Наиболее значительные смещения (свыше 1 мкм) имеют место в паяном слое между DBC-керамикой и медным основанием. После определенного числа термоциклов начинается ухудшение теплового контакта в этом соединении и увеличение теплового сопротивления. Следствием становится лавинообразный рост градиента температуры и разрушение сварного шва.

На рис. 2 показано соотношение характеристик теплового расширения в модулях различной конструкции: с медным основанием, с основанием из композитного материала AlSiC и без базовой платы. Во всех трех случаях DBC-подложка изготовлена из нитрида алюминия AlN. Использование базовой платы из AlSiC снижает рассогласование коэффициентов теплового расширения, однако этот материал имеет большее значение теплового сопротивления, что в итоге приводит к повышенному нагреву кристалла. Кроме того, стоимость композитного основания намного выше медного.

Практически все проблемы устраняются при использовании технологии непосредственного прижимного соединения керамики и теплоотвода (**pressure-contact-technology**), применяемой в модулях SKiiP. При такой конструкции градиент температуры на участке «кристалл — теплоотвод» снижается более чем на 5–10% по сравнению с модулем, имеющим медное основание, и обеспечивается отличное согласование CTE.

Стремление к снижению габаритов и связанное с ним увеличение плотности мощности неизбежно приводит к повышению

плотности потока тепла, что создает серьезные проблемы при проектировании системы охлаждения. Достижения технологии последних лет привели к появлению кристаллов IGBT с предельно высокими значениями плотности тока при тех же градиентах температуры кристалла. В результате возрастает «тепловой вклад» перехода «корпус — радиатор», а характеристики теплоотвода и всей системы охлаждения становятся определяющими при проектировании конструкции преобразователя.

Штампованные радиаторы, параметры которых ранее вполне удовлетворяли разработчиков, не способны обеспечить необходимые тепловые характеристики при использовании модулей IGBT последних поколений. В итоге не удается полностью использовать их мощностные параметры, тепловое сопротивление  $R_{\text{thsa}}$  (радиатор — окружающая среда) оказывается недопустимо высоким, даже при наилучшем согласовании характеристик теплоотвода и вентилятора. Однако благодаря дешевизне данного класса радиаторов из алюминиевых сплавов они по-прежнему находят применение при плотности мощности, не превышающей 1000–1500 Вт/м<sup>2</sup>/К.

Новые профили радиаторов, предназначенных для использования в режиме принудительного воздушного охлаждения (рис. 3), позволяют снизить тепловое сопротивление и повысить эффективность преобразования. Впрочем, они дороже в производстве, поэтому их использование оправдано при плотности мощности более 1000 Вт/м<sup>2</sup>/К.

На рис. 4 представлено примерное соотношение стоимости и эффективности различных способов отвода тепла, используемых в промышленности: принудительное воздушное охлаждение, жидкостное охлажде-

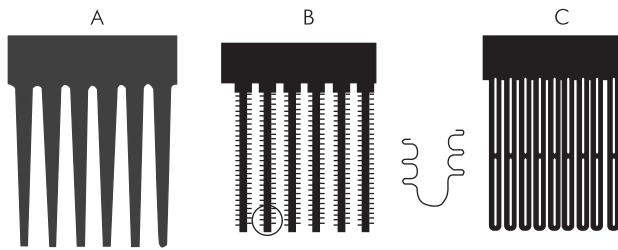


Рис. 3. Формы ребер радиатора: А — классическая, В — двойное оребрение, С — комбинированная

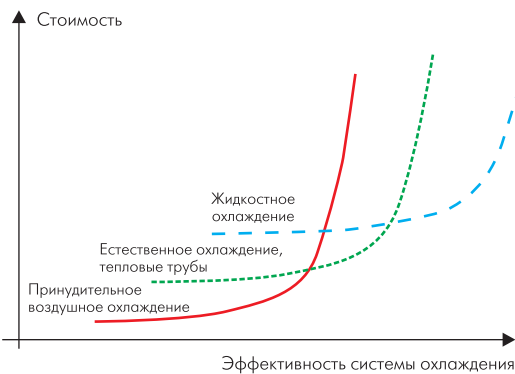


Рис. 4. Соотношение стоимости и эффективности различных систем охлаждения

ние и естественный теплоотвод с применением тепловых труб.

В тех случаях, когда требуется рассеивать достаточно большую мощность при естественной конвекции воздуха, лучшим решением является использование тепловых труб. Необходимость в таком способе отвода тепла возникает, если нет возможности прибегнуть к помощи жидкостного охлаждения (например, по технологическим причинам) и принудительного воздушного охлаждения (в условиях очень грязных сред). При естественном отводе тепла увеличение площади радиатора целесообразно только до определенных пределов, пока тепловая постоянная времени дает возможность теплу от создающего его источника распространяться по поверхности радиатора. Применение тепловых труб позволяет многократно увеличить эффективность теплоотвода. При меньшем весе, тех же размерах и разности температур на их концах они способны передавать тепло в десятки, сотни, а иногда и тысячи раз больше, чем сплошные

стержни, изготовленные из высокотеплопроводных материалов, таких, как медь и серебро.

Классическая тепловая труба (рис. 5) представляет собой вытянутый в длину герметичный, как правило, тонкостенный металлический сосуд (1), внутренние стенки которого выложены капиллярно-пористым материалом, так называемым фитилем (2). Фитиль имеет малую толщину и пропитан рабочей жидкостью. Внутренний объем (3), свободный от фитиля, заполнен паром этой жидкости и является паровым каналом.

Если один конец тепловой трубы подключить к источнику тепла с температурой  $T_1$ , а другой — к приемнику тепла с температурой  $T_2$ , несколько меньшей  $T_1$ , то тепловая труба будет передавать значительное количество тепла  $Q$ , которое во много раз больше, чем тепло, передаваемое сплошным стержнем, изготовленным из самых теплопроводных материалов и имеющим те же габариты и такую же разность температур между концами, что и тепловая труба.

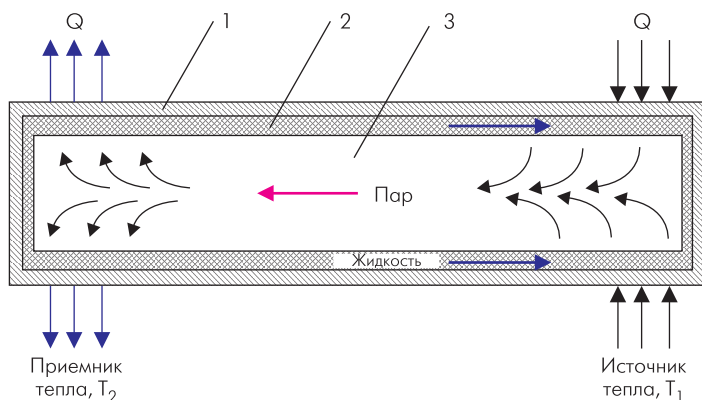


Рис. 5. Конструкция тепловой трубы

Лучшим способом отвода тепла для конвертеров мощностью свыше 1 МВт является жидкостное охлаждение, широко применяемое на электротранспорте или в тех случаях, когда охлаждающая жидкость используется в технологическом процессе, например, в автомобильной технике. Кроме высокой эффективности жидкостное охлаждение обеспечивает снижение габаритов преобразовательного устройства. Однако в ветроэнергетике данный способ отвода тепла практически не применяется, поскольку в этом случае требуется массивный теплообменник, а также дорогая и недостаточно надежная система рециркуляции жидкости.

В связи с постоянным совершенствованием электронных ключевых элементов, борьбой за снижение динамических потерь и увеличением скоростей коммутации IGBT появилась необходимость разработать силовые соединительные шины с минимальными значениями распределенной индуктивности.

Наличие паразитных индуктивностей приводит к увеличению напряжения на транзисторе при его закрывании (или обратном восстановлении диода) на  $L_B \times di/dt$ , где  $di/dt$  — скорость изменения тока в шине (или тока обратного восстановления), а  $L_B$  — общая индуктивность шины. Суммарное напряжение может превысить значение напряжения пробоя и вывести транзистор из строя. Наибольшую опасность процесс выключения имеет при срабатывании защиты от перегрузки по току, когда значение  $di/dt$  максимально. Энергия  $E_S$ , запасаемая в паразитных индуктивностях силовых цепей, определяется как  $E_S = L_B \times I^2/2$ . Из формулы видно, что значение энергии пропорционально квадрату рабочего тока, поэтому для силовых устройств уменьшение распределенных индуктивностей приобретает особое значение. При создании топологии модулей SEMIKRON этой проблеме уделяется особое внимание. В результате тщательной проработки конструкции паразитная индуктивность внутренних связей модулей сведена к физическому минимуму, и для безопасной работы SEMIKRON рекомендуется установка только одного снабберного конденсатора на терминалах питания.

Однако проблема распределенных параметров внешних соединительных шин стоит очень остро, и для ее решения применяются симметричные плоские многослойные конструкции (planar bus bars). Использо-

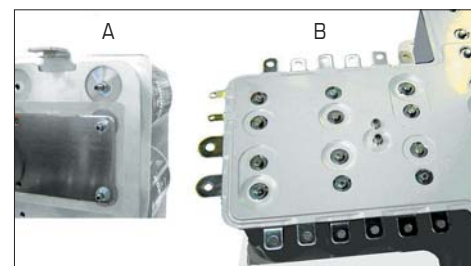


Рис. 6. Варианты конструкции силовой шины: А — обычная, В — многослойная ламинированная



**Таблица 2.** Сравнительные характеристики стандартных ЭК HITACHI и конденсаторов MKP Electronicon

Тип	U <sub>н</sub> , В	ESR, мОм (20 °С)	R <sub>thj</sub> , °С/Вт	I <sub>max</sub> , A <sub>RMS</sub>	L <sub>с</sub> , нГн	Размер, мм	Срок службы, тыс. ч. (75 °С, I <sub>ном</sub> )
HP3-1000 мкФ-450 В HITACHI	450	110	8,9	4,35	20	40×81	19
E50-1100 мкФ-900 В ELECTRONICON	900	0,47	2,3	80	40	116×165	100
E50-1100 мкФ-1100 В ELECTRONICON	1100	0,4	1,7	100	50	116×230	100

ние многослойных шин, связывающих терминалы питания IGBT-модулей и банк конденсаторов, позволяет минимизировать паразитные индуктивности и, соответственно, уровень перенапряжений и улучшить электромагнитную совместимость.

В преобразовательной технике два типа многослойных шин: обычная (рис. 6а), состоящая из пакета плоских проводников с проложенными между ними слоями изоляции, и ламинированная (рис. 6в). Проводящие слои шин обычно изготавливаются из меди и медных сплавов, хотя в некоторых случаях предпочтительна латунь, бронза и бериллиево-медные сплавы. Материалами для изготовления изоляторов ламинированных шин в зависимости от применения служат полистирольные, поливинилфторидные пленки и ароматические полиамидные полимеры. В окончательном виде ламинированная силовая шина, состоящая из набора проводящих и изолирующих слоев, пресуется с помощью эпоксидного наполнителя для получения максимально жесткой конструкции. Первый вариант шин обычно предназначен для недорогих конвертеров, производимых малыми партиями, второй — для более дорогих серийно выпускаемых преобразователей.

Ламинированные шины обладают существенными преимуществами — они компактнее и безопаснее для обслуживающего персонала, в них проще обеспечить необходимое напряжение изоляции. При проектировании данного типа шин удается минимизировать площадь токовых «петель» и, таким образом, получить предельно низкие значения распределенных индуктивностей. Популярность ламинированных многослойных шин растет с каждым годом, уже несколько европейских фирм предлагает изготовление подобных изделий на заказ, самыми известными производителями подобной продукции являются компании ELDRE, AUXEL, ROGERS corp.

На силовую шину устанавливается банк конденсаторов, соединенных параллельно-последовательно для получения необходимого номинала и рабочего напряжения, и уравнивающие резисторы. Стандартное напряжение используемых сегодня электролитических конденсаторов (ЭК) составляет 400 или 450 В, и до недавнего времени приходилось применять последовательное соединение двух или трех емкостей для безопасной работы в сетях, соответственно 420 VAC и 690 VAC. В условиях непрерывного роста мощностей, увеличения требований по надежности и безотказности современных силовых преобразователей технологии элект-

ролитических конденсаторов практически исчерпали свои возможности, хотя по соотношению емкости на единицу объема и стоимости данному типу емкостей пока нет альтернативы.

Разработка новых полипропиленовых технологий производства конденсаторов практически позволила решить проблемы, связанные с надежностью и необходимостью последовательного соединения. Конденсаторы, выпускаемые компанией ELECTRONICON [4] по технологии MKP для применения в DC-шинах мощных преобразователей, имеют рабочее напряжение до 1300 В, емкость до 2000 мкФ, обладают свойством автовосстановления при локальном пробое, допускают гораздо более высокий ток пульсаций на единицу объема. Еще одно интересное свойство данных элементов — низкое эквивалентное последовательное сопротивление (ESR — Equivalent Series Resistor, см. табл. 2). Данный параметр влияет не только на уровень рассеиваемой мощности. Сопротивление ESR в контуре, образованном паразитными индуктивностями шин и емкостями звена постоянного тока и снабберных цепей, служит демпфирующим фактором, предотвращающим возникновение генераций в переходных режимах. При использовании полипропиленовых конденсаторов особое внимание надо уделять проработке топологии линий связи с точки зрения минимизации влияния переходных процессов.

При этом габариты и стоимость элементов не намного превосходят размеры и цену обычных электролитов, особенно если учесть, что один конденсатор нового типа может заменить «гирлянду» параллельно-последовательно соединенных ЭК с соответствующим количеством уравнивающих сопротивлений. Основные сравнительные характеристики электролитических и полипропиленовых конденсаторов приведены в таблице 2.

### Несколько слов о конструкции

Не существует специальных стандартов, регламентирующих требования к конструкции ВЭУ, и как было указано выше, при разработке преобразователей ветрогенераторов обычно применяются принципы и требования, используемые в транспортных применениях:

- большой срок службы: обычно свыше 20 лет при минимально возможном значении интенсивности отказов FIT (Failure In Time). Высокие показатели надежности должны обеспечиваться при самых жест-

ких условиях эксплуатации, касающихся климатических и механических воздействий, а также термостратификации;

- хорошая ремонтпригодность;
- низкие массогабаритные показатели.

Напомним, что параметр FIT характеризует количество отказов в час, наблюдаемых при определенных условиях эксплуатации некоторого количества компонентов в течение определенного времени:

$$FIT = \lambda = n_f / (N \times t),$$

где  $n_f$  — количество обнаруженных отказов;  $N$  — количество испытываемых компонентов;  $t$  — время испытаний.

Значение параметра FIT должно приниматься во внимание при выборе электронных компонентов, включая технологию их производства и корпусирования, способности противостоять внешним воздействиям. При проектировании конструкции должна учитываться надежность входящих элементов, их совместимость, а также надежность крепежных элементов и сборки в целом. Все приведенные показатели непосредственно влияют на срок службы изделия и стоимость эксплуатации, от них зависит рентабельность и целесообразность всего проекта. Силовой преобразователь является одной из самых дорогих частей ВЭУ, во многом именно он определяет надежность и стоимость готового изделия, а неисправность электромеханических компонентов ветротурбины прежде всего сказывается на электронном конвертере.

Конструкция ВЭУ подвержена влиянию электрических, механических, химических, тепловых воздействий. Ее создание, с точки зрения стойкости к упомянутым факторам, — один из самых сложных этапов разработки, требующий от соответствующих специалистов немалых знаний и опыта. При выборе конструкционных материалов необходимо учитывать их совместимость, стойкость к воздействию агрессивных сред, а также механические и тепловые характеристики.

Хорошая ремонтпригодность является необходимым требованием к аппаратуре любой энергетической отрасли, в том числе и в ветроэнергетике. Любой из компонентов ВЭУ должен иметь возможность свободного доступа, диагностики, ремонта и замены. В первую очередь это относится к преобразователю, как к самому сложному элементу



**Рис. 7.** Модуль SKiIP и сборка конвертер/инвертор SEMISTACK для ВЭУ



Рис. 8. Производство и испытание сборок в дизайнерском центре SEMIKRON во Франции

конструкции. Для обеспечения ремонтпригодности должны выполняться следующие требования:

- конструкция ВЭУ должна быть модульной;
- вес каждой составной части не должен превышать 30 кг;
- в конструкции каждого модуля должны быть предусмотрены технологические части для монтажа/демонтажа, комплект поставки должен содержать специальный инструмент;
- конструкция ВЭУ должна исключать взаимное повреждение составных частей при ремонте и замене;
- в конструкции ВЭУ необходимо предусматривать защиту от несанкционированного вмешательства;
- при проектировании упаковки для составных частей ВЭУ следует учитывать самые жесткие требования по климатическим и механическим воздействиям при транспортировании.

На рис. 7 показана одна из последних разработок международного дизайнерского центра SEMIKRON — сборка конвертер/инвертор для ветрогенератора и интеллектуальный силовой модуль SKiiP2403GB172, на основе которого выполнена данная разработка. Все перечисленные требования и концепции разработки во многом относятся к любой аппаратуре, которая должна длительно и надежно функционировать в самых жестких условиях.

### Разработка, производство и сервис

Огромный интерес к источникам альтернативной энергии вообще, и к ветроэнергетике в частности, приводит к тому, что ВЭУ из уникальной техники превращаются в массовую продукцию, а рынок ветротурбин и преобразователей к ним растет год от года. Однако следует учесть, что разработка и производство подобной техники на высоком уровне практически непосильны для одного предприятия. Именно поэтому одной из основных проблем, возникающих на первом этапе проектирования, становится поиск партнеров, имеющих наибольший опыт разработки каждой из составных частей готового изделия. При выборе такого партнера необходимо ответить на следующие вопросы:

- как долго предприятие работает на данном рынке, уровень компетентности, насколько быстро им может быть выполнена разработка;
- какие показатели надежности имеет выпускаемая продукция, какие виды испытаний входят в программу тестирования. Необходимо учесть, что промежуточный контроль на стадии производства и 100%-ная проверка выходных параметров изделия помогают устранить риск ранних отказов и спрогнозировать поведение аппаратуры в процессе эксплуатации;
- уровень предоставляемого сервиса в процессе продажи и наладки оборудования, качество выполнения технической документации, возможность технического сопровождения в процессе эксплуатации, ответственность производителя за возможные отказы.

Для удовлетворения указанным требованиям компания SEMIKRON, известная своими уникальными разработками в области мощных преобразователей, недавно объединила девять своих научных центров, расположенных в Южной Корее, Австралии, Южной Африке, США, Франции, Англии, Бразилии, Индии и Словении, в глобальную международную дизайнерскую сеть (Solution Centers Network). Основная задача нового центра — создание базовых конструкций силовых сборок для основных промышленных применений. Наличие таких «платформ» позволяет быстро адаптировать готовый продукт в соответствии с требованиями заказчиков, находящихся в различных странах. Включение исследовательских лабораторий, разбросанных по всему миру, в единую сеть позволяет объединить их возможности в области разработки, испытаний, маркетинга, логистики и технического сопровождения. На фотографиях (рис. 8) показаны две из множества линий производства и контроля выходных параметров выпускаемых изделий.

Расположение исследовательских лабораторий в различных странах мира делает глобальную сеть более конкурентоспособной. Прежде всего, это обеспечивается возможностью локальной поддержки заказчика, ее оперативностью и близостью к конечному потребителю. Главной задачей инженеров, конструкторов и менеджеров каждой из лабораторий сети является нахождение оптимального решения, максимально полно

удовлетворяющего специфическим требованиям, сформулированным заказчиком.

Первые мощные сборки для конкретного применения, получившие название SEMISTACK, созданы компанией SEMIKRON около 50 лет назад. Эти изделия, разрабатываемые и производимые фирмой, могут содержать силовые модули (тиристорные, MOSFET, IGBT), устройства управления и защиты (драйверы), датчики, блок конденсаторов, систему охлаждения. Все они проходят полный цикл сертификационных испытаний.

За прошедшие 50 лет инженерами и конструкторами SEMIKRON накоплен уникальный опыт разработок мощных конвертеров, поэтому вполне закономерно, что более 15000 типов таких изделий успешно эксплуатируются в различных отраслях промышленности. Диапазон выпущенных сборок SEMISTACK широк: от простейших выпрямителей зарядных устройств до блоков, работающих в лифтах, ветроэлектростанциях, гелиоустановках, электромобилях, субмаринах.

Однако в первую очередь инженеры компании специализируются на проектировании сложных изделий, главным требованием к которым является надежная работа в тяжелых условиях эксплуатации. К ним относятся преобразователи для ветрогенераторов и электротранспорта. В настоящее время SEMIKRON широко известен как мировой лидер в области производства подобных изделий. Яркое подтверждение высоких достижений компании — 57% ветрогенераторов мощностью от 500 кВт до 1,5 МВт, работающих в энергосистемах по всему миру, используют конвертеры SEMIKRON.

Создание единой дизайнерской сети SEMIKRON позволило объединить все имеющиеся у компании ресурсы в области проектирования, производства и маркетинга и повысить эффективность и качество работы. Философия исследовательской сети заключается в «глобальной работе в рамках локальной задачи» — такая концепция позволяет максимально приблизить все имеющиеся ресурсы к решению конкретной проблемы. Где бы ни находился заказчик, он всегда может рассчитывать на оперативную и квалифицированную поддержку специалистов ближайшего локального дизайнерского центра SEMIKRON на любом этапе работы.

### Литература

1. Frédéric Sargos. Power electronics for converters in windmills // STACK Marketing Manager. SEMIKRON France
2. Wintrich A., Schreiber D. Minis control the giants: Electronic power components as subsystems of energy conversion // Elektronikpraxis. March 2001.
3. Колпаков А. И. Альтернативная энергетика и SEMIKRON // Электронные компоненты. № 9'2003.
4. Колпаков А. И. Конденсаторы ELECTRONICON для высоковольтных преобразовательных устройств // Компоненты и технологии. № 6'2004.