

Интеллектуальная силовая электроника:

от настоящего к будущему

Эволюция интегрированных силовых компонентов — силовых ключей, микросхем и модулей — наиболее перспективное направление интеллектуальной силовой электроники. Сегодня эта отрасль развивается стремительно — прежде всего, благодаря успехам в совершенствовании технологии изготовления и в значительном улучшении параметров мощных полевых транзисторов (MOSFET), биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), диодов, силовых драйверов (микросхем). Интеграция схем управления и сопряжения (контроллеров, драйверов) в силовые ключи (точнее, в модули), а затем в исполнительные устройства и механизмы стала необходимым и естественным шагом. Широко осуществляемый переход от аналогового управления к цифровому (на базе микропроцессоров и микроконтроллеров) происходит также и в интеллектуальной силовой электронике. В настоящее время и тем более в будущем широкое развитие интеллектуальной силовой электроники однозначно предопределено.

Владимир Ланцов

vvlantsov@list.ru

Саркис Эраносян

sergera840@mail.ru

Иntenсивное развитие силовой электроники в конце XX века было обусловлено глобальными проблемами энергообеспечения, обострившими внимание к проблемам обеспечения энергоэффективности и энергобезопасности, прежде всего в области силовых устройств (СУ). Главным образом речь идет об усовершенствовании всех систем энергоснабжения (экономичность, бесперебойность электропитания, надежность и живучесть СУ) на фоне постоянного роста потребности в электроэнергии и цен на энергоносители. Поэтому многие специалисты считают XXI век веком силовой электроники. Работа авторов, посвященная интеллектуальной силовой электронике, написана в 2005 г. и опубликована в начале 2006 г. [1]. За прошедшее с тех пор время это направление силовой электроники развивалось очень динамично. Поэтому авторы считают полезным и необходимым рассказать о произошедших за минувшие годы изменениях. Кроме того, важно еще раз проанализировать особенности и тенденции развития интеллектуальных (интегрированных) силовых устройств.

Немного истории

В работе [1] была достаточно подробно прослежена история развития интеллектуальных силовых компонентов от их зарождения и до наших дней. Кратко напомним некоторые важные вехи. Первые сведения о «разумных» силовых микросхемах специалисты в СССР получили в 1985 г. из журнала «Электроника» (Electronics): «Начало промышленного выпуска «разумных» мощных ИС» (Г. Бирман). Такие интеллектуальные мощные интегральные схемы получили название Smart Power. Их структура

представляла собой сочетание на одном кристалле силовых элементов вместе с логическими и аналоговыми ИС, а также с отдельными компонентами. В то время рынок сбыта таких микросхем оценивался достаточно оптимистично — до \$80 млн в 1986 г., \$1,2 млрд — к 1992 г. (по прогнозам специалистов фирмы Siliconix). На практике подобный оптимизм не оправдался, и все фактически ограничилось выпуском сравнительно небольшой номенклатуры специальных устройств. Для примера можно указать интеллектуальные силовые ИС фирмы STMicroelectronics (ST) семейства L290 [2]: одноканальный драйвер для управления нагревательными и электромагнитными устройствами по релейному закону; двухканальный драйвер — для управления шаговым двигателем; импульсный стабилизатор напряжения (или тока) с ШИМ-регулированием. Выходная мощность ИС — до 160 Вт (в импульсе) при напряжении питания 40(46) В и выходном токе до 4 А. В микросхемах предусмотрена защита от токовых перегрузок, короткого замыкания (КЗ), перегрева и другие функции; выходные ключевые каскады — на мощных биполярных транзисторах. Можно также отметить выпуск моделей Smart Power фирмы Siliconix [3]. В частности, Smart Power-кристалл ИС типа DG568/569 содержал матрицу, состоящую из 500 ячеек КМОП(СМОС)-вентилей, а также восемь мощных полевых транзисторов с изолированным затвором (MOSFET) на 200 В. Максимальное приближение приборов Smart Power к будущим интеллектуальным (интегрированным) силовым модулям — Integrated Power Modules (IPM) — в то время было достигнуто в приборе OM9015FS фирмы Omniprel [4]. Он представлял собой комбинацию мощных полупроводниковых приборов, допол-

ненную схемами управления, и был выполнен в миниатюрных герметичных толсто пленочных модулях. Практически это была первая законченная схема импульсного источника вторичного электропитания (ИВЭ) без моточных элементов.

Начальный этап развития интеллектуальных силовых компонентов условно завершился к середине 1990-х. Как уже упоминалось, чрезмерный оптимизм относительно быстрого роста рынка сбыта этих приборов не оправдался. Причины этого, по нашему мнению, кроются в следующем:

- неподготовленность широкого круга специалистов и потребителей к восприятию новых идей и продуктов, а главное — к их применению (пришлось бы отказаться от наработанных годами схемно-конструктивных решений и готовых СУ);
- сравнительно невысокий, по современным воззрениям, уровень параметров мощных силовых ключей с преобладанием в их массе биполярных транзисторов;
- гораздо более высокие цены на Smart Power, как на более сложные изделия (зачастую заказные).

В техническом аспекте отметим, что в то время уровень интеграции микросхем и микросхем (РЭА) еще не достиг высокого уровня. В самом деле, в вычислительной технике были еще широко распространены микропроцессоры первого поколения iN86AT (i286AT, i386AT, i486AT) с рабочими частотами 16–120 МГц и оперативной памятью 1–16 Мбайт. Первые микропроцессоры iPentium с новой структурой вычислений конвейерного типа (iPentium 66 и iPentium 75) только начали появляться в 1990-х. В аналоговой технике дело не продвинулось дальше создания сдвоенных и счетверенных операционных усилителей (ОУ), компараторов, таймеров. В дополнение ко всему авторы придерживаются мнения, что развитию этого направления микроэлектроники препятствовали производители «рассыпных» компонентов: транзисторов, диодов, микросхем и т. п., опасаясь уменьшения объемов налаженного производства, потерь прибыли, к тому времени немалой. Таким образом, устройства Smart power несколько обогнали свое время, но их разработка и применение заложили основу дальнейшего развития интегрированных силовых компонентов.

На следующем этапе, то есть к середине 1990-х годов, зарубежные фирмы параллельно с интеллектуальными силовыми микросхемами стали создавать модели «самозащищенных» интеллектуальных силовых ключей. Такие ключи, также называемые IPS (Integrating Power Switches), создавались на более совершенных мощных и надежных MOSFET, а не на биполярных транзисторах. К их числу относятся низковольтные (50–70 В) IPS: так называемые TOPFET (Temperature and Overload Protection), PROFET (PROtected) и другие. В них в силовой MOSFET-ключ был встроен узел защиты от различных перегрузок: токовое ограничение силового выхода и защита от КЗ, защита от перегрева, а также защита от перенапряжений и КЗ по цепи питания управления.

Кроме того, могли быть встроены функции диагностики разрыва цепи нагрузки, быстрого размагничивания сердечника индуктивной нагрузки (например, трансформатора). В качестве примеров можно привести следующие низковольтные IPS: VNP20N07 (STMicroelectronics), BUK106-50L (Philips), BTS442E2 (Infineon/Siemens) [5]. Наиболее широко они стали применяться в автомобильной электронике и для управления различными электромеханическими устройствами (электродвигатели, соленоиды, заслонки).

В то же время ведущие фирмы силовой электроники Siemens, Motorola, International Rectifier и другие начинают в большом объеме производить силовые модули на основе MOSFET- и IGBT-транзисторов. Силовые модули разделяются на стандартные и интеллектуальные (интегрированные) — Integrating Power Switches (IPM). В статье [6] предложено определение IPM: устройство высокой степени интеграции, объединяющее в одном корпусе или на одном кристалле силовой каскад и схему управления затворами. Модули представляли собой комбинацию (полумосты и мосты, одно- и трехфазные) только мощных высоковольтных MOSFET (500В) вместе с силовыми диодами (антипараллельными), производство которых уже было хорошо освоено. Аналогично появляются сборки нового класса силовых полупроводниковых приборов — биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) на напряжение 600–1200 В. Модули выполнялись в специальных корпусах, в которых все выводы электрически изолированы от металлического корпуса (основания).

Фирма Power Integrations (PI) в развитие идей IPS и интеллектуальных силовых микросхем (но уже с высоковольтным ключом) предложила новые продукты для AC/DC-преобразователей. Это были IPS средней «высоковольтности» (700 В), в частности, различные модификации так называемых TOP Switches [7]. По своей структуре они представляют комбинацию MOSFET, интегрированного в одном SIPMOS-чипе с несложным ШИМ-контроллером. Также имеется схема защиты от токовых перегрузок, перегрева и перенапряжения на выходе. Первое поколение семейства импульсных преобразователей-стабилизаторов TOPSwitches-204–214 было выполнено в стандартных транзисторных корпусах ТО-220 и рассчитано на создание импульсных ИВЭ на основе обратноточковых преобразователей. Рабочая частота 90–110 кГц. Выходная мощность 10–100 Вт (при входном сетевом напряжении 176–264 В, 50(60) Гц). Модели четвертого поколения семейства TOP Switches-GX (TOP242–250) при частоте преобразования 100–130 кГц позволили реализовать выходную мощность ИВЭ уже от 10 до 260 Вт (при тех же условиях).

Обзор современного состояния интегрированных силовых компонентов

Российский рынок силовых компонентов в основном заполнен продукцией импортно-

го производства. В работе [8] в этом аспекте для силовых модулей приводится показатель 95%, хотя при этом существуют и российские аналоги. Поэтому при изложении материала авторы вынуждены больше опираться на достижения ведущих зарубежных фирм в указанной области, хотя и отечественным успехам будет справедливо уделено внимание. Предварительно укажем, что на современном этапе многие фирмы значительно усовершенствовали технологию изготовления (HEXFET, CoolMOS, TrenchMOS, HiPerFET) мощных высоковольтных (≥ 500 –1200 В) MOSFET и технологии (SPT, WARP, ...) IGBT на напряжения 600, 1200, 1700 В, что позволило улучшить их силовые параметры. Кроме того, удалось добиться серьезных успехов и в улучшении параметров быстродействующих диодов. Все это также способствовало успехам в развитии силовых модулей, в том числе и интеллектуальных.

Интегрированные силовые модули

В настоящее время объемы выпуска интегрированных силовых модулей (IPM) непрерывно растут, постоянно расширяются их области применения:

- первичные системы и источники электропитания (ветроэлектроэнергетика, солнечная электроэнергетика);
- вторичные системы и источники электропитания, в том числе системы и источники гарантированного и бесперебойного питания;
- смешанные (гибридные) системы электропитания (на основе углеводородных и биотопливных элементов);
- железнодорожный и городской рельсовый транспорт;
- промышленное оборудование (обрабатывающие центры, металлургическое электрооборудование и т. д.);
- сварочные агрегаты;
- высоковольтные модуляторы, рентгеновские аппараты и лазеры;
- изделия оборонной техники и др.

Конкретные технические реализации аппаратуры на основе IPM:

- устройства регулирования электропривода постоянного и переменного тока;
 - инверторы, преобразователи энергии;
 - коммутационная и защитная аппаратура.
- В IPM используются следующие полупроводниковые структуры:
- диодно-тиристорные, в том числе с запираемыми тиристорами (IGCT);
 - MOSFET: чопперы, полумосты и мосты с антипараллельными диодами в ключах;
 - IGBT: чопперы, полумосты, одно- и трехфазные (6 IGBT) мосты (с антипараллельными диодами в ключах);
 - комбинация выпрямительного диодного моста с инвертором в одно- и трехфазном (6 IGBT) исполнении с добавлением «тормозного» ключа (7-й IGBT);
 - более интегрированные MOSFET- и IGBT-структуры со встраиванием силовых управляющих драйверов.

Таблица 1. Основные технические характеристики некоторых интегрированных IGBT-модулей

Тип, фирма	Технология	Схема	IGBT						Диоды	
			U_{CES} , В	I_C , А	P_{TOT} , кВт	U_{CEsat} , В	Q_{G}/E_{off} , мкКл/мДж	$R_{th(j-c)}$, К/Вт	I_F , А	
MI200-12A4 (Ixys)	NPT IGBT	полумост	1200	270	1,13	2,7	-/21	0,11	300	
FF300R12ME4 (Infineon)	Trench/ Fieldstop	полумост + терморезистор	1200	300	1,6	2,1	2,25/25	0,094	300	
FF1400R121P4 (Infineon)	Trench/ Fieldstop	полумост + терморезистор	1200	1400	7,65	2,05	9,6	0,0195	1400	
MK1100-12EB (Ixys)	NPT3 IGBT	полный мост	1200	115 (80 °C)		2,0	-/10	0,19	200	
FS450R1212KE4 (Infineon)	Trench/ Fieldstop	3-фазный инвертор (3 полумоста + терморезистор)	1200	675	2,25	2,1	3,3	0,066	450	
MWI450-12E9 (Ixys)	NPT3 IGBT	То же	1200	640	2,2	2,2	3,3/47	0,057	450	
MWI300-17E9 (Ixys)	NPT3 IGBT	То же	1200	500	2,2	2,3 (тип)	2,6/80	0,057	290 (80 °C)	

Интегрированные силовые модули на основе MOSFET выпускаются на напряжения до 600 В и на токи 20–100 А, то есть на мощность не более 10 кВт. Это объясняется тем, что их стоимость при напряжениях более 600 В (800–1000 В) существенно возрастает — по сравнению с IGBT-модулями. Поэтому, если существует необходимость использовать IPM на MOSFET на большее напряжение в каких-то применениях, то обычно используются их последовательное включение по питанию. Для получения больших токов прибегают к параллельному соединению таких структур. Кстати, подобные решения используются и при реализации IPM на IGBT на напряжения 2500 В (3300 В) и выше в некоторых энергетических устройствах и системах. Такой способ может оказаться более дешевым, а иногда и более надежным.

Ведущие зарубежные фирмы Ixys, Infineon, APT, IR, Fairchild, Semikron, Mitsubishi и др. выпускают широкую гамму IPM на напряжения 600, 1200, 1700, 2500В, 3300, 4500, 6300, 10000 В и токи нагрузки от 30–100 А (мини-IPM) [6] до 4500 А (IPM большой мощности) в различном исполнении и для различных применений [9–13].

В этой статье мы ограничимся рассмотрением классов, параметров и областей конкретного применения IPM только на основе перспективных MOSFET- и IGBT-модулей, не затрагивая диодно-тиристорных и симисторных.

Для иллюстрации возможностей интегрированных силовых модулей рассмотрим некоторые из них. В таблице 1 приведены особенности структуры, технология и основные технические характеристики IGBT-модулей фирм Infineon и Ixys.

В 2004–2008 гг. отечественные фирмы освоили широкий ряд силовых модулей, в том числе IPM, на высокие напряжения и большие токи. Отметим для иллюстрации некоторые из них. Так, в ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) за последние 10 лет увеличено производство IGBT-модулей с 35 до 300 типов (в 10 конструктивных исполнениях). Эти успехи стали возможны благодаря помощи, которую оказали немецкие фирмы Infineon и Eupes, а также представляющая их на российском

рынке компания «Интех Электроникс» [14]. Благодаря сотрудничеству с этими фирмами ОАО получило доступ к высоким технологиям в области силовой IGBT-электроники. На предприятии разработана и внедрена в производство серия IGBT-модулей, рассчитанных на большие напряжения и токи: от 600 В (50–4800 А) до 6500 В (25–600 А). Модули ОАО «Электровыпрямитель» выпускаются по схемам одиночных ключей (МТКИ, МТКИ-1), чопперов (МТКИД, МДТКИ), полумостовых (М2ТКИ) и трехфазных инверторов (М6ТКИ). Конечно, по определению, к интеллектуальным модулям можно отнести только две последние структуры. Модули соответствуют международным стандартам и выпускаются на основе системы качества ISO 9001:2000. В таблице 2 приведены некоторые параметры модулей ОАО «Электровыпрямитель», в частности, напряжение насыщения U_{CES} и оптимальная частота работы — в зависимости от технологии и рабочего напряжения [15]. Нетрудно заметить, что с повышением рабочего напряжения выше 1700 В увеличивается величина U_{CES} и заметно снижается оптимальная частота работы (с 5–20 до 0,5–1,5 кГц), конечно, с учетом технологии изготовления.

В ОАО «Электровыпрямитель» разработаны и освоены в производстве IGBT-модули транспортного типа, предназначенные для преобразовательного оборудования подвижного состава российских железных дорог. Модули этой серии могут работать в условиях жестких климатических и механических воздействий. По заказу ОАО «Российские железные дороги» разработаны IGBT-модули с напряжением электроизоляции 13 кВ. Создание таких модулей решает проблему преобразования напряжения контактной сети 3000 В в стабильное напряжение бортового питания электровозов независимо от всех возможных колебаний и перенапряжений в тяговых сетях. На их основе разработаны высоковольтные преобразователи частоты (ВПЧА) с выходной мощностью от 500 до 2000 кВт для электроприводов асинхронных двигателей с напряжениями 6 и 10 кВ.

Отметим также продукцию отечественной фирмы «Электрум АВ» [16], которая выпу-

скает интеллектуальные силовые модули со структурами полумост, двойной полумост, трехфазный инвертор с дополнительным чоппером. Рабочие напряжения 60, 100, 200, 400, 600, 1200 В, а рабочие токи до 75–100 А. Такие модули могут содержать в своем составе, кроме кристаллов MOSFET или IGBT, также низкоомные (до 1 мОм) безиндуктивные резисторы для измерения токов в шинах питания или в фазных шинах. Для управления одиночными и полумостовыми модулями выпускаются драйверы.

Интегрированные драйверы

Драйверы для силовых MOSFET и IGBT-ключей в начале 1990-х одной из первых стала разрабатывать фирма International Rectifier (IR): одноканальные — для одиночного ключа (низкопотенциального и высокопотенциального) и двухканальные — для полумостовой структуры [12]. Затем в середине 1990-х фирмой был создан первый драйвер для управления трехфазным инвертором. Все драйверы IR21xx выполнены в стандартных корпусах микросхем (DIP, SOIC, SSOP и т. д.), поэтому они относительно маломощные. В настоящее время насчитывается несколько десятков драйверов этой фирмы.

Двухканальные драйверы для управления полумостами имеют следующие характеристики: на напряжение 600 В — IR2110, IR2113; на 1200 В — IR2213, IR2214. Эти драйверы допускают выходной ток (в импульсе) — от +1,4/-1,8 А до +2/-3 А в зависимости от типа.

Шестиканальные драйверы для управления трехфазными инверторами: на напряжение 600 В — IR2133, IR2135, IR2136; на 1200 В — IR2233, IR2235, IR22361, допускающие выходной ток (в импульсе) от +0,12/-0,25 А до +0,2/-0,48 А в зависимости от типа. В настоящее время IR предлагает новые высокоскоростные ($t_{on}/t_{off} = 80–120$ нс) драйверы серии IRS219x для управления «полумостом» на напряжение 600 В и выходные токи от 0,5 до 4 А.

Другие компании (Eupes, Semikron и т. д.) основное внимание уделяют более мощным драйверам, выполняемым уже на печатных платах и предназначенным для управления силовыми IGBT-модулями большой мощно-

Таблица 2. Технология и общие технические характеристики силовых IGBT-модулей ОАО «Электровыпрямитель»

Напряжение U_{CES} , В	600		1200				1700		2500	3300	6500
Технология	NPT Low Loss	NPT Standard	NPT Low Loss	NPT Ultra Fast	Trench Gate	SPT	NPT Low Loss	Trench Gate	SPT	SPT	SPT
$U_{CE(sat)}$, В (25/125 °C)	1,95/2,2	2,5/3,1	2,1/2,4	3,0/3,6	1,7/2,0	1,9/2,1	2,6/3,1	2,0/2,4	2,5/3,1	3,1/3,8	4,2/5,4
Оптимальная частота, кГц	5–20	4–12	1–8	15–25	1–5	2–20	5–20	1–2	1–2	0,5–1,5	≤0,5

сти (десятки и сотни киловатт). В частности, компания Semikron использует популярную идеологию «ядра» для создания универсальных модулей управления IGBT-модулями. Например, в драйвере SKYPER32 заложена идея сопряжения IGBT-модуля с интерфейсной платой, устанавливаемой на его корпус [17]. Ядро SKYPER32 составляют базовые узлы:

- блок обработки сигнала с изолированным интерфейсом;
- блок защиты и мониторинга;
- выходные каскады управления изолированными затворами IGBT;
- встроенный DC/DC-преобразователь с выходными напряжениями (однополярное +15 В и двуполярное +15/-7 В);

Основные параметры двухканального SKYPER32:

- гальваническая развязка сигналов управления с помощью импульсных трансформаторов (изоляция по стандарту EN50178PD2);
- выходной пиковый ток — до 15 А;
- напряжение изоляции — 4 кВ;
- виды защит: от выхода ключа из насыщения — DESAT (desaturation); UVLO (Under Voltage Lock Out) — от снижения напряжения питания драйвера; подавление коротких импульсов помех; программируемое время t_{di} .

Российская фирма «Электрум АВ» для управления своими модулями предлагает драйверы со следующим набором функций [16]:

- гальваническая (оптронная) высоковольтная развязка сигналов управления и состояния;
- контроль насыщения на коллекторе IGBT;
- активная защита от перенапряжений на транзисторе;
- регулировка времени включения и выключения транзистора;
- контроль уровня питающих напряжений драйвера;
- плавное выключение транзистора с блокировкой управления и другие функции.

Развивая идеологию, заложенную в SKYPER32, компания Semikron недавно разработала двухканальный драйвер SKYPER52, предназначенный для управления IGBT-модулями с напряжением до 1700 В на основе цифрового способа передачи данных [17]. Изолирующий барьер формируется посредством трех импульсных трансформаторов, обладающих очень малыми значениями паразитной емкости развязки (единицы пикофарад). Два трансформатора используются для передачи данных, а третий — для управления встроенным DC/DC-преобразователем, питающим выходные каскады драйвера. Основные параметры SKYPER52:

- выходной пиковый ток — до 50 А;
- напряжение управления затворами — 15 В;
- выходная мощность — 9 Вт/канал (среднее значение);
- максимальная рабочая частота — 100 кГц;
- мониторинг критического повышения частоты;
- виды защит: а) динамическая защита от перегрузки по току и КЗ с индивидуальной настройкой и функцией intellectual turn-off; б) UVLO и другие (как в SKYPER32);

- изолированная передача сенсорных сигналов (например, температура IGBT-модуля);
- цифровая настройка блока обработки сигнала ошибки;
- диагностический CAN-интерфейс.

Как видно из вышеизложенного, SKYPER52 на деле представляет собой высокоинтеллектуальный драйвер, способный обеспечить надежную работу IGBT-модулей большой мощности в системах с цифровым управлением.

IPM для импульсных ИВЭ

Фирмы Ixys [9] и Infineon [10] разработали и выпускают основные IPM для сетевых ИВЭ (AC/DC-преобразователей): узлы активного корректора коэффициента мощности (ККМ/PFC) и работающего на него инвертора с использованием MOSFET-ключей. В работе авторов [18] приведен пример схемы импульсного ИВЭ с выходной мощностью 1200 Вт (27 В/45 А) с применением интегрированных компонентов, в том числе IPM фирмы Ixys. В частности, применены ККМ-модуль типа VUM33-05N и MOSFET-модуль однотактного прямоходового преобразователя напряжения по схеме «косого» моста типа VHM40-06P1. Параметры VUM33-05N следующие: однофазный выпрямительный мост ($U_{RRM} = 800$ В) и чоппер (MOSFET Boost): $U_{DSS} = 600$ В, $I_D = 47$ А, $R_{DSon} = 0,12$ Ом; диод — $U_{RRM} = 600$ В. Параметры VHM40-06P1 (CoolMOS) для каждого из 2-х MOSFET: $U_{DSS} = 600$ В, $I_D = 38$ А, $R_{DSon} = 0,07$ Ом; $t_r/t_f = 95/10$ нс. У встроенных антипараллельных диодов: $U_{RRM} = 600$ В, $I_{FM} = 18,5$ А, $t_{rr} = 70$ нс (ток 10 А).

Фирма IR предлагает для построения ККМ новый интеллектуальный драйвер IR1150S [12], который позволяет создавать ККМ с мощностью от 75 Вт до 1 кВт (в некоторых случаях до 4 кВт) при значении КМ (cosφ) не менее 0,99. Драйвер может работать на частотах 50–200 кГц, а его выходной (пиковый) ток — до 1,5 А. В комплекте с этим драйвером фирма, в зависимости от мощности, рекомендует использовать:

- бустерный диод типа 8ETX06, 15 ETX06 и другие;
- MOSFET типа IRFPS43N50K, IRFP460A и другие;
- WARP/WARP2NPT IGBT типа IRGP35B60PD, IRGP50B60PD и другие.

Авторы настоящей статьи, в свою очередь, предлагают для сетевых ИВЭ применять три наиболее распространенных в настоящее время типа схем, а именно:

- а) схема на основе однотактного обратногоходового преобразователя (flyback DC/DC);
- б) схема однотактного прямоходового преобразователя (forward DC/DC) с двумя одновременно коммутируемыми ключами (транзисторами);
- в) двоянный преобразователь по схеме (б), в котором ключи работают со сдвигом по фазе на 180° и имеют общий LC-фильтр.

При этом целесообразно ограничить количество SIPM в синтезируемых ИВЭ — не более четырех типов [19, 20]. Некоторые типы SIPM

применительно к мощному (400 Вт) ИВЭ авторами теоретически уже проработаны [21].

IPM для регулируемого электропривода

Еще более быстрыми темпами растет применение IPM в системах электропривода. Во всем мире ежегодно выпускается примерно 7 млн. электродвигателей, они потребляют около 70% общего количества произведенной электроэнергии. По оценкам специалистов [22], сектор маломощного (приближенно до 4 кВт) электропривода занимает более половины рынка промышленных электроприводов малой и средней (до 40 кВт) мощности. То же можно сказать и про приводы бытовой техники для холодильников, стиральных машин, кондиционеров. Пока IPM имеют реальное воплощение лишь в регулируемом промышленном электроприводе, развивающемся наиболее быстрыми темпами. В последнее время выпуск электродвигателей переменного тока с интегрированными в них преобразователями частоты существенно возрастает. Так, если в 1999 г. их выпустили порядка 40 тыс. штук (около \$46 млн), то в 2006 г. их число возросло примерно до 220 тыс. штук (около \$195 млн.). По данным исследований британского института IMS, доля частотно-регулируемых приводов (ЧРП) составляет до 50% мирового рынка силовой электроники [23].

Фирма IR [12] предлагает IPM для электроприводов малой мощности, в частности, для использования в массовом промышленном электроприводе и приводе бытовой техники. Предложены интеллектуальные силовые модули платформы PlugN&Drive в серии IRAMxxUP60x — трехфазные инверторы для управления электроприводом с мощностью от 600 до 2500 Вт, с параметрами IGBT:

- IRAMS10UP60B: $U_{CES} = 600$ В, $I_C = 10$ А (25°C) — для электропривода до 750 Вт;
- IRAMY20UP60B: $U_{CES} = 600$ В, $I_C = 20$ А (25°C) — для электропривода до 2500 Вт.

Также предложены две версии модулей — «А» и «В». Версия «А» использует трехфазный мост на IGBT: 6 кристаллов 600-вольтовых IGBT (NPT, 5-го поколения) и 6 обратно включенных диодов с открытыми эмиттерами в нижних плечах. Версия «В» — та же структура, но с включением силового шунта для контроля тока в нулевом проводе. Для комплексного использования этих IPM предложена платформа Imotion — интегрированная платформа для разработки цифрового сервопривода на базе цифровых управляющих схем серии IRMCKxxx и программного продукта ServoDriver. В частности, в этих схемах используется кристалл трехфазного драйвера типа IR21365 в широком диапазоне частот ШИМ — до 20 кГц [24].

Отметим важность концентрации усилий на перспективных направлениях разработки высокоэффективных IPM для решений новых задач в области регулируемого электропривода большой мощности. С этой целью фирма Semikron в 2004 г. объединила 9 научных центров в Южной Корее, Австралии, США, Франции, Англии и в других странах в глобальную дизайнерскую сеть. Главная задача

этого альянса — создание базовых конструкций для основных промышленных применений [23]. Первым проектом стала разработка платформы конфигурации B6U + B6C1, то есть 3-фазный выпрямитель + инвертор. Платформа SEMIKUBE предназначалась для построения приводов мощностью 75–1000 кВт. Концепция SEMIKUBE позволила обеспечить широкий набор мощностей за счет небольшого набора стандартных базовых блоков. Интересно, что в действительности единственный модуль представляет собой куб с размером грани около 40 см. Блок состоит из силового каскада со звеном постоянного тока, платы драйвера, осуществляющей функции управления, защиты и мониторинга, а также набора датчиков для осуществления этих функций. SEMIKUBE применяется в приводах асинхронных двигателей, а также в системах выработки электроэнергии. Условия эксплуатации модулей SEMIKUBE: напряжение питания переменного тока — 3×400 В (50 Гц) или 3×460 В (60 Гц); частота ШИМ — 3 кГц; $\cos\varphi = 0,85$; $T_{\text{окр}} = 40^\circ\text{C}$. Выбор класса напряжения IGBT определяется типом питающей сети. Например, для сети стандарта 3×380 В (50 Гц) предназначены модули с напряжением 1200 В, а для сетей 3×690 В (60 Гц) — с напряжением 1700 В. Увеличение выходного тока производится с помощью параллельного соединения 2, 4 или 8 модулей IGBT. В блоках SEMIKUBE устанавливаются IGBT-модули 128-й (технология SPT) или 176-й (технология Trench) серий:

- SKM300GB128D или SKM400GB128D — на напряжение 1200 В;
- SKM200GB176D или SKM400GB176D — на напряжение 1700 В.

Серия миниатюрных модулей MiniSKiiP, разработанная фирмой Semikron для использования в приводах мощностью до 30 кВт, нашла свое широкое применение. На европейском рынке доля этих компонентов составляет до 46% для указанного диапазона мощностей [6]. Продолжая это направление, компания Semikron к 2008 г. разработала новое поколение ИРМ с интегральным драйвером на основе технологии SOI, полностью исключающей «зашелкивание» IGBT. MiniIPM имеют стандартную конфигурацию для электропривода: входной трехфазный мостовой выпрямитель, трехфазный IGBT-инвертор и тормозной чоппер. Семиканальный драйвер в виде высоковольтной интегральной схемы (HVIC) вырабатывает управляющие импульсы для всех 6 транзисторов инвертора и еще для чоппера. Он также осуществляет защиту от токовых перегрузок. Входы управления драйвера совместимы и с TTL-3,3В и КМОП. Драйвер может работать при напряжении питания 10–17 В.

Время задержки сигнала порядка 300 нс. И кристаллы транзисторов, и чип драйвера, и резисторы затворов установлены на одной плате. В таблице 3 представлены основные характеристики этих Mini-IPM.

Российская фирма ООО «Электрум АВ» разработала и выпускает интеллектуальные малогабаритные модули общепромышленного и оборонного назначения для управления коллекторными, асинхронными, вентильными и вентильно-индукторными электродвигателями мощностью до 10–15 кВт [16]. В состав модулей помимо кристаллов MOSFET или IGBT могут входить мощные низкоомные (1 мОм) безиндуктивные токоизмерительные резисторы, аналого-цифровое устройство управления, реализующее алгоритм управления электродвигателем. Такое устройство содержит: драйверы транзисторов, источник питания (DC/DC-преобразователь), схему ШИМ-управления, логику управления двигателями и необходимые интерфейсные схемы. В частности, модули управления коллекторными двигателями переменного тока мощностью до 10 кВт с рабочими токами 1–20 А обеспечивают:

- плавный пуск двигателя;
- стабилизацию скорости вращения двигателя под нагрузкой и на холостом ходу;
- контроль тока электродвигателя и защиту от КЗ;
- контроль токо-временной характеристики работы двигателя;
- повторный пуск двигателя при прерывании тока из силовой цепи;
- защиту по цепи питания;
- защиту от перегрева и др.

Встраивание ИРМ непосредственно в электродвигатели

Появившаяся в 2003–2004 гг. информация о встраивании ИРМ и интегрированных силовых драйверов в маломощные электродвигатели (шаговые двигатели) сравнительно быстро привела к практическим результатам, что является важным моментом в развитии современного электропривода. Тогда фирма Animators (США) анонсировала выпуск семейства высоко интегрированных шаговых двигателей (ШД), получивших название Smart motor [25]. Фирма Animatics является пионером и признанным лидером в области интеллектуальных электроприводов. Семейство Smart motor серий ST230 и ST340 — это совершенные, компактные «интеллектуальные» ШД со встроенными в них силовыми драйверами, контроллерами с достаточно большим объемом памяти (энергонезависимая — 28 и энергонезависимая — 32 Мб) и с возможностью внешнего управления по интерфейсу RS232/RS485. Кроме того, в них встроены ин-

крементные декодеры для считывания угла поворота вала двигателя. Таким образом, для функционирования таких Smart motor необходимы только внешние источники питания (20–80 В) и канал связи с компьютером для задания законов и режимов работы. В России достаточно быстро стали проводиться разработки аппаратуры с использованием этих интеллектуальных электродвигателей для прецизионной аппаратуры, в которой требуется с высокой точностью измерять или воспроизводить угловые перемещения.

ИРМ для автомобильной силовой электроники

Важным направлением в развитии интеллектуальных силовых модулей является их использование в так называемых гибридных транспортных средствах — гибридомобилях. Своим названием они обязаны тому, что используют для движения, например, автомобиля комбинацию двигателя внутреннего сгорания с электродвигателем. Одной из первых такие модули начала разрабатывать и выпускать фирма Semikron [26]. Модули получили название SKAI (сначала Semikron Automotive Inverter, а потом — Semikron Advanced Integration). Но так как область применения таких модулей оказалась широкой (подъемники, транспортеры, погрузчики и другие), то окончательно за ними в некоторых вариантах закрепилось название SKADS (Semikron Advanced Drive Systems). В настоящее время прежде всего на Западе (в связи с повышением требований по топливной эффективности (энергосбережению), безопасности и экологичности автомобилей) заметно усилился интерес к гибридомобилям [27]. Гибридные автомобили (Hybrid Electric Vehicles — HEV) работают и на бензине, и на электричестве (электрический двигатель). Несмотря на присутствие их на рынке в течение уже многих лет, по оценке Research&Market объем продаж «гибридов» не превышает 2%, в том числе в Европе — не более 0,2%. Глобальный экономический кризис значительно стимулировал работы над ними. Так, согласно отчету «Global Hybrid Car/MarketForecast to 2010», глобальные продажи гибридных автомобилей будут увеличиваться с совокупным среднегодовым темпом роста порядка 12%; продажи таких автомобилей в США в 2012 г. достигнут 1 млн. штук. Уже анонсировано, что первые компактные модели таких автомобилей появятся на рубеже 2009–2010 гг. Мировые автогиганты (Toyota, Honda, Nissan, Ford, General Motors, Daimler, BMW, Mercedes-Benz и другие) ускоренно разрабатывают подобные модели. Главные проблемы — создание экономичных аккумуляторов (литий-ионных) с возможностью быстрого заряда, организация сети «электрозаправок» и постепенное снижение стоимости таких автомобилей

ИРМ для других перспективных применений

Глобальный экономический кризис ускорил темпы реализации и других перспективных применений с использованием ИРМ. Так, в августе 2009 г. в средствах массовой инфор-

Таблица 3. Основные характеристики мини-интегрированных IGBT-модулей (mini-IPM) фирмы Semikron

Тип	IGBT							Выпрямитель
	Схема	P, кВт	U _{CEV} , В	I _{CV} , А	I _{C ном} , А	U _{CE (sat)} , В	R _{th (j-c)} , К/Вт	
SKiiP25NAD1066V1	C1B	4,0	600	39	30	1,45	1,35	370
SKiiP26NAD1066V1	C1B	5,5	600	59	50	1,45	0,95	370
SKiiP37NAD1066V1	C1B	7,5	600	79	75	1,45	0,75	700
SKiiP25AC1124V1	6-расс	15	1200	72	50	1,85	0,65	—

Примечание. C1B (Converter-Inverter-Brake) — трехфазный выпрямитель в комплексе с трехфазным инвертором, управляемым драйвером, и тормозным чоппером; 6-расс — трехфазный инвертор, управляемый драйвером, и терморезистор.

мации (на телеэкране) было продемонстрировано экологически чистое, целиком работающее на солнечных батареях малое надводное судно вместе с пассажирами. США, Германия, Великобритания, Япония и другие страны приняли программы по ускоренному развитию и массовому внедрению экологически чистых источников энергии, в том числе на солнечных батареях и с использованием силы ветра. В настоящее время в Японии и Германии целые жилые дома используют в качестве единственного источника энергии только солнечные батареи и панели. Ветроэлектростанции и ветроэлектрогенераторы широко используются в Германии, Швеции, Норвегии и других странах. Естественно, что в целях экономичности и надежности в них в различных сочетаниях широко используются интегрированные силовые модули.

О применении IPM в аппаратуре военного назначения

Известно, что уже с начала 2000 г. решением ВПК и затем Министерства обороны РФ было разрешено применение импортных компонентов в аппаратуре военного назначения. Это было сделано из-за отсутствия в требуемой номенклатуре отечественных компонентов, аналогичных по параметрам, уровню и качеству. Такое решение было связано также и с тем, что, во-первых, в России во много раз сократились объемы выпуска компонентов с приемкой «5» и выше; во-вторых, многие предприятия оказались в ближнем зарубежье; в-третьих — и это главное — после 1991 г. практически прекратились разработки и внедрение перспективных электронных компонентов. В аспекте рассматриваемого вопроса это касалось в том числе и новых силовых компонентов (MOSFET, IGBT), а также силовых модулей на их основе. Поскольку Military-электронные компоненты в Россию не поставляются, было принято решение использовать в аппаратуре военного назначения импортные компоненты промышленного исполнения. Предварительно они прошли сертификацию в соответствующих организациях (ЦНИИ-22 МО РФ, г. Москва, РНИИС «Электронстандарт», г. Санкт-Петербург и др.) и включались в соответствующие ограничительные перечни применения. Однако в настоящее время положение несколько изменилось в лучшую сторону. Отечественные предприятия на основе внедрения новых зарубежных технологий и современного высокопроизводительного оборудования вполне успешно налаживают изготовление современных MOSFET, IGBT и силовых, в том числе интеллектуальных, модулей.

Современный этап развития интеллектуальной силовой электроники пройден. Его основные приметы:

- уверенное развитие Smart Powers;
- начало внедрения (встраивания) интеллектуальных силовых компонентов в исполнительные устройства и механизмы, в частности в электродвигатели на примере ШД (Smart motor);
- значительные темпы развития технологии производства с улучшением параметров

силовых компонентов – MOSFET и IGBT, особенно IGBT;

- совершенствование устройств аналогового управления (драйверы, контроллеры), встраиваемых в Smart Powers;
- начало использования цифрового управления в силовых устройствах благодаря применению цифровых силовых драйверов, а также микропроцессоров (микроконтроллеров);
- большее внимание к проблемам повышения безотказности и долговечности, к возможности применения модулей в условиях жестких механических и климатических воздействий (подвижной состав, аппаратура военного назначения);
- успехи развития отечественных фирм в разработке и производстве современных IGBT-модулей.

Прогноз дальнейшего развития интегрированной силовой электроники

На основе имеющейся информации попытаемся заглянуть в будущее интеллектуальной силовой электроники. Безусловно, дальнейшее развитие получат архитектура (структуры) этих компонентов и входящие в них узлы и устройства. Серьезно возрастут объемы применения интеллектуальных силовых компонентов: микросхем, IPS и IPM (SIPM). Следует отметить последние достижения в полупроводниковой (MOSFET, IGBT, мощные высоковольтные диоды Шоттки) и микроэлектронной (чипы высокой степени интеграции, SMD-компоненты и т. д.) технологии. Очевидны успехи компьютерной технологии (микроконтроллеры, цифровые сигнальные микроконтроллеры, флэш-память большого объема), успехи в области полимеров, планарных моточных изделий, «микрочечатных» плат. Все это, наряду с успехами силовых компонентов, дает мощный импульс дальнейшему развитию интеллектуальной силовой электроники. Рассмотрим подробнее возможные направления развития.

По оценкам специалистов, реально можно прогнозировать, что MOSFET прочно займут нишу мощностей примерно до 10 кВт при напряжениях сначала 1500 В, а затем и до 1700–2000 В. В то же время IGBT уверенно утвердятся в диапазоне мощностей на сотни-тысячи киловатт при напряжениях до 6000–8000 В [28]. Одновременно расширится частотный диапазон их работы, но уже без больших прорывов. Будут предприняты шаги по интеграции в одном модуле силовых компонентов различного вида, благодаря чему, в частности, появились сами IGBT. Уже сегодня в некоторых работах предложено комплексирование MOSFET и IGBT в одном корпусе по схеме параллельного соединения [29]. Такая структура позволяет при сравнительно небольших рабочих токах использовать канал (плечо) MOSFET для уменьшения статических потерь благодаря малой величине сопротивления открытого канала. При этом попутно улучшаются и динамические параметры силового ключа. В то же время при больших токах, в том числе в аварийных режимах, дополнительно

используется канал IGBT. Общая рассеиваемая мощность комбинированного ключа меньше, чем если бы использовался только один вид транзисторов. Следует ожидать, что в силовую часть модулей большой и очень большой мощности будет дополнительно встроено ряд датчиков для диагностики работоспособности. Возможны и другие варианты совершенствования собственно силовой части IPS и IPM.

При дальнейшем развитии следующее поколение этих и других IPM мы, вероятно, будем условно называть силовыми модулями высшей степени интеграции (Super IPM или SIPM). Скорее всего, они будут представлять собой полностью «самозащищенные» силовые ключи.

Нас ожидает переход IPM от аналогового на цифровое управление при использовании более «продвинутых» драйверов и контроллеров. Номенклатура и возможности силовых драйверов с цифровой передачей данных (таких как SKYPER52 фирмы Semikron) будет расширяться. Более широкое применение получит использование микроконтроллеров с развитой «инфраструктурой» (обрамлением) и большим объемом памяти. Это позволит реализовать некоторые функции, которые сейчас выполняются в простейшем виде или вообще отсутствуют.

Для примера укажем на работу [30], в которой описан высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с управлением от микропроцессора. Источник типа ВИП35–350 предназначен для питания рентгеновской трубки БХВ-18 и обеспечивает на выходе импульсное однополярное напряжение до 35 кВ, анодный ток — до 350 мА. Силовая часть выполнена на IGBT-модуле типа BSM300GA120DN2 (Infineon) или МТКИ2-300-12 (ОАО «Электровыпрямитель»). И подобные применения не будут единичными.

То же самое можно сказать и о цифровых сигнальных процессорах (DSP-контроллерах), которые фирма Texas Instruments успешно продвигает для управляемого интеллектуального электропривода [31]. Изменение правил и алгоритмов функционирования интеллектуальных силовых объектов осуществляется не аппаратно, а путем изменения программ, записываемых во флэш-память.

Дальнейшее расширение сферы применения интеллектуальных силовых компонентов

Интеллектуальные силовые компоненты станут привычными электронными компонентами для разработчика, такими, какими на сегодняшний день являются дискретные MOSFET, IGBT, драйверы, ШИМ, ЧИМ и ККМ/ PFC-контроллеры. В идеале можно предположить, как это ранее было показано на примере Smart motor, что для организации автоматизированных силовых систем потребуются только персональный компьютер (компьютерный комплекс), каналы связи (в том числе беспроводные), источник(и) электропитания (при необходимости) и программное обеспечение. Возможно встраивание в IPM (SuperIPM) и модулей Ethernet, которые сегодня уже интегрируются в промышленные компьютеры.

В качестве примеров укажем такие перспективные сферы широкого применения интеллектуальных силовых компонентов:

- источники и системы вторичного электропитания — низковольтные и высоковольтные, в том числе системы гарантированного и бесперебойного электропитания;
- электроприводы различного назначения со встраиванием ИРМ (SIPM) и силовых драйверов, в том числе цифровых, непосредственно в корпусе электродвигателей;
- интеллектуальные исполнительные механизмы и устройства (электромагнитные, пневмо- и гидроклапаны, заслонки, вибропитатели и прочие) со встроенными интеллектуальными силовыми компонентами, что особенно важно при работе в тяжелых условиях эксплуатации;
- автомобильная силовая электроника — гибридомобили;
- ответственные промышленное оборудование (прокатные станы, обрабатывающие центры, подъемно-транспортные устройства, конвейеры, компрессоры и другие);
- солнечная, биотопливная и ветроэлектроэнергетика;
- бытовые электроприборы и установки (кондиционеры, холодильники, стиральные машины, электроинструмент);
- робототехнические системы и устройства.

Последнее применение очень важно для повышения качества продукции, а также для повышения производительности труда. Интенсивное развитие данного направления наблюдается сейчас в Японии, которая вынуждена все больше конкурировать с промышленностью Китая с его огромными резервами дешевой рабочей силы. Не менее важно это и для России при складывающейся в ней неблагоприятной демографической ситуации, а также в связи с выходом на мировой рынок (вступление в ВТО). Как раз интеллектуальная силовая электроника и является одним из реальных направлений hi-tech и инноваций, о чем так много говорят и пишут на самых высоких уровнях.

Вместе с тем применение новой интеллектуальной силовой электроники поставит перед разработчиками, технологами и производителями новые серьезные задачи и предъявит к ним повышенные требования. В этом контексте, прежде всего, отметим следующее:

- Интеграция в одном корпусе очень мощных, высоковольтных силовых ключей и низковольтной управляющей микроэлектроники предъявляет повышенные требования к *обеспечению качества электрической развязки (изоляции)* силовой и управляющей частей, в том числе и в динамических режимах (du/dt и di/dt), а также к их *электромагнитной совместимости (помехоустойчивости, помехозащищенности)*.
- Потребуется существенно повысить инженерную, технологическую и производственную культуру, поскольку эти изделия будут сложными и дорогими. В этой связи, в частности, изготовители интеллектуальных силовых компонентов еще больше внимания

должны будут уделять рекомендациям по применению своих изделий.

- Станет еще более актуальной необходимостью в принятии дополнительных мер по *обеспечению надежности* функционирования при воздействии экстремальных внешних факторов: несанкционированные включения-отключения, в том числе при техногенных авариях и катастрофах; значительные импульсные помехи; сбои в системах автоматизированного управления; климатические, механические и иные воздействия и т. п.
- При дальнейшем развитии следующее поколение описанных и других ИРМ, вероятно, будем условно называть силовыми модулями высшей степени интеграции (Super IPM или SIPM). Они должны будут представлять собой функционально полную совокупность «самозащищенных» силовых ключей со встроенными интегральными контроллерами (драйверами) управления, комплексной защитой от различных перегрузок и аварийных ситуаций, а также развитой системой диагностики и мониторинга.
- Как известно, любые прогнозы — вещь неблагодарная. Однако следует иметь в виду извечные истины: «новое — это хорошо забытое старое»; «развитие происходит по диалектической спирали». Так что удивляться ничему не следует, а надо лучше знать историю развития данной отрасли знаний. К сожалению, в настоящее время в России интеллектуальной силовой электронике все еще уделяется не так много внимания, как хотелось бы. Впрочем, определенные положительные сдвиги имеются. Поэтому, по мнению авторов, возможно, было бы целесообразным развивать интеллектуальные силовые компоненты в инновационных центрах или технопарках, создание которых практически не осуществляется. ■

Литература

1. Ланцов В., Эраносян С. Интеллектуальная силовая электроника: вчера, сегодня, завтра. // Силовая электроника. 2006. №1.
2. SMART POWER. Application manual. STMicroelectronics (www.st.com), 1989.
3. www.siliconix.com (www.vishay.com)
4. Полузаказные «разумные» мощные ИС на базе матричных кристаллов, создаваемые всего за 45 суток. // Электроника. 1988. № 10.
5. Каталог электронных компонентов FARNELLINONE (www.farnellinone.com), 2004- 2005
6. Колпаков А. Mini- IPM — интеллект и компактность. // Силовая электроника. 2008. №4.
7. Power Integrations, Inc. (www.powerint.com). Date Book, Design Guide and Seminar Handbook, 2002.
8. Кокорева И. Отечественная силовая электроника. Фирмы-производители. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. №3.
9. www.ixys.com
10. www.infineon.com
11. www.advancedpower.com

12. www.irf.com
13. www.creepower.com
14. Аксенов В., Бормотов А., Мартыненко В., Мускатиньев В., Чибиркин В. IGBT-модули производства ОАО «Электровыпрямитель». // Силовая электроника. 2006. №2.
15. Мускатиньев В., Мартыненко В., Чибиркин В., Бормотов А. ОАО «Электровыпрямитель» расширяет производство IGBT-модулей // Силовая электроника. 2008. №3.
16. Волошин С. «Электрум АВ» — быстрее, выше, сильнее. // Компоненты и технологии. 2005. №1.
17. Хермвиль М., Колпаков А. SKYPER52 — первый сверхмощный цифровой драйвер IGBT от компании SEMIKRON. // Силовая электроника. 2008. №3.
18. Ланцов В., Эраносян С. Интегрированные компоненты — основа построения современных источников питания. // Силовая электроника. 2006. №3.
19. Эраносян С., Ланцов В. Интеллектуальные силовые модули для источников электропитания — один из путей возрождения отечественной микроэлектроники XXI века. // Электропитание. 2005. №1, 2.
20. Эраносян С., Ланцов В. Пути развития и архитектура отечественных интегрированных модулей для импульсных источников вторичного электропитания. // Электропитание. 2005. №3, 4.
21. Эраносян С., Ланцов В. Разработка интегрированных силовых модулей и их применение в источниках вторичного электропитания. // Современная электроника. 2006. №8.
22. Колпаков А. Перспективы развития электропривода. // Силовая электроника. 2004. №1.
23. Колпаков А. Инверторная программа SEMIKUBE — вопросы выбора. // Силовая электроника. 2009. №1.
24. Башкиров В. Интеллектуальные силовые модули компании International Rectifier для электропривода малой мощности. // Силовая электроника. 2005. №1.
25. www.animatics.com
26. Колпаков А. Модули SKAI/SKADS — предельный уровень интеграции. // Силовая электроника. 2005. №3.
27. Сысоева С. Топливная экономия, эффективность, экологичность — атрибуты новых автомобилей, двигателей и систем. // Компоненты и технологии. 2009. №6.
28. С. Флоренцев. Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники. // Современные технологии автоматизации. 2004. №2.
29. А. Ширяев. Конструируем силовой ключ. // Современная электроника. 2004. №2.
30. Владимиров Е., Ланцов В., Лебедева О. Высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с управлением от микропроцессора. // Современная электроника. 2007. №7. 2008. №1.
31. А. Лапин. Новое поколение изделий компании TEXAS INSTRUMENTS для управляемого электропривода. // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2005. № 6.