

Интеллектуальные силовые модули компании International Rectifier

для электроприводов малой мощности

В статье рассмотрены особенности интеллектуальных силовых модулей компании International Rectifier, предназначенных для использования в массовом промышленном электроприводе и приводе бытовой техники мощностью до нескольких киловатт.

Владимир Башкиров

irmoscow@online.ru

Введение

Сектор привода малой мощности является самым емким на рынке электроприводов. Анализ рынка промышленного электропривода показывает, что наибольшим спросом пользуется привод малой (до 3,7 кВт) и средней (до 37 кВт) мощности. Причем на долю приводов мощностью до 3,7 кВт приходится около 75% всего рынка. Этот же диапазон мощностей характерен и для приводов бытовой техники: холодильников, стиральных машин, кондиционеров.

Доля регулируемых приводов в общем объеме приводов малой мощности для промышленных приложений и бытовой техники увеличивается все более ускоряющимися темпами. На период с 2004 по 2010 год прогнозируется рост рынка приводов малой мощности более чем в 2,5 раза. Ожидается, что на рубеже 2010 года будет преодолен рубеж в \$3 млрд. При этом доля регулируемых приводов возрастет с 22 до 55%. Регулируемый привод обеспечивает до 50% экономии электроэнергии, до 40% экономии воды, высокую точность стабилизации требуемых параметров (температура, давление, скорость). За счет этого он окупается за гораздо более короткий срок.

В настоящее время суммарный годовой объем производства составляет десятки миллионов комплектов, растет интерес к силовым ИС управления и силовым модулям высокой степени интеграции взамен традиционных схем с применением дискретных полупроводниковых приборов. При этом решающими факторами являются рентабельность производства привода, его эффективность и надежность.

На рынке силовых интеллектуальных модулей малой мощности до последнего времени были наиболее распространены семейства модулей компаний Mitsubishi и Fairchild. Компания International Rectifier вышла на рынок с новым семейством интеллектуальных модулей. Благодаря ряду технических новаций они способны успешно конкурировать со свои-

ми аналогами и обладают большими резервами для совершенствования и расширения.

Особенности схемотехники и устройства интеллектуальных модулей IR

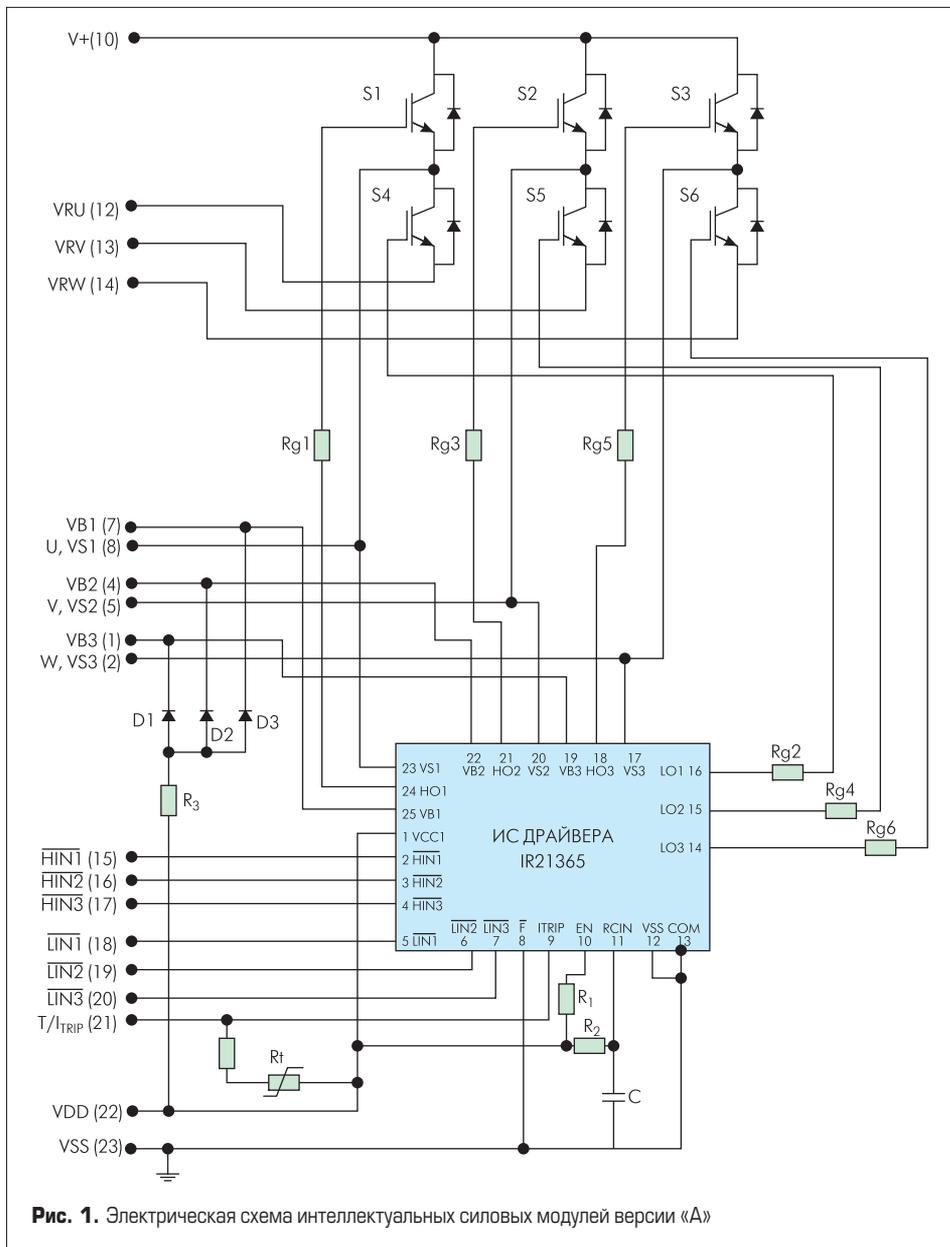
Модули нового семейства, как и их аналоги, предназначены для реализации управления трехфазными бесконтактными электродвигателями — асинхронными и бесконтактными двигателями постоянного тока. Поэтому в их состав также входит трехфазный инвертор со схемой управления и защиты. Однако по сравнению с аналогами они обладают рядом преимуществ.

Варианты исполнения электрической схемы — большая гибкость при применении

В отличие от своих аналогов модули IR выпускаются с несколькими версиями исполнения электрической схемы. В настоящее время серийно производятся две версии модулей — «А» и «В». Версия «А» (рис. 1) — вариант с открытыми эмиттерами нижних ключей инвертора, версия «В» (рис. 2) — вариант со встроенным шунтом в цепи шины нулевого потенциала. Это позволяет реализовать различные комбинации токовых обратных связей и выбирать оптимальную применительно к конкретному случаю.

Широкий диапазон частот ШИМ

В состав модулей, как и в их аналоги, входит по шесть кристаллов IGBT-транзисторов и антипараллельных ультрабыстрых диодов. В отличие от модулей Mitsubishi, где применяются Trench IGBT, и модулей Fairchild, выполненных с применением так называемых Current Sense IGBT (часть структуры кристалла используется для съема информации о токе коллектора), в модулях IR используются 600-вольтовые NPT IGBT 5-го поколения, позволяющие работать на частотах ШИМ до 20 кГц включительно. К их достоинствам также относятся простота параллельного соединения, прямоугольная зона безопасной работы и низкий уровень потерь на переключе-



ние, особенно при выключении, при относительно низких потерях на проводимость. Возможность работы на более высоких частотах ШИМ позволяет избежать акустических шумов (одно из требований для бытовой техники) и обеспечит более широкий диапазон регулирования скорости.

Повышенная степень интеграции

В отличие от конкурирующих модулей, где для управления ключами инвертора применяются три драйвера верхних ключей и один драйвер нижних ключей, в модулях IR использован один кристалл трехфазного драйвера IR21365. Драйверы серии IR2136x были специально разработаны с учетом специфики приводов небольшой мощности, совместимы со всеми типами логики КМОП и TTL с уровнями от 3,3 В. Это позволяет подавать управляющие сигналы от микроконтроллера непосредственно на входы управления верхних и нижних ключей (HIN, LIN) без использования дополнительных преобразующих каскадов. Драйверы этой серии специально рассчитаны на меньшие, чем у драйверов других серий, токи накачки затворов силовых ключей, поэтому имеют существенно более низкую цену. Они обеспечивают блокировку по низ-

кому напряжению питания, защиту от перегрузки по току и перегреву. Как и все высоковольтные интегральные драйверы, ИС серии IR2136x питаются от единственного источника питания с напряжением 15 В (вход 22). Их использование позволило упростить конструкцию и снизить цену комплектации. Как и модули Fairchild, модули IR содержат цепь тепловой защиты на термисторе Rt. В отличие от аналогов, в модули IR дополнительно введены бутстреп-диоды D1-D3 и резистор R3 источника питания драйвера, RC-цепи управления временем срабатывания защиты от перегрузки по току, ограничительные резисторы Rg1-Rg6 в затворах ключей инвертора. В модулях версии «А» эмиттеры нижних ключей S4-S6 соединены непосредственно с выводами 12-14 модуля. К этим выводам подсоединяются шунты для получения информации о токах в фазах двигателя. Информация от схем тепловой защиты и защиты от перегрузки по току поступает на один и тот же вывод 21-го модуля. Модули версии «В» (рис. 2) содержат встроенный прецизионный безындуктивный шунт Rs в цепи нулевой шины силового питания. Кроме того, информация схем тепловой защиты и защиты от пе-

регрузки по току поступают на отдельные входы 13 и 22.

Прогрессивная технология корпусирования

Модули IR принципиально отличаются от аналогов по технологии корпусирования. Модули Mitsubishi серии PsxxE производятся в DIP-корпусе одного типоразмера (79×36 мм), как и модули Fairchild серии FSAM (60×36 мм). По технологии оба корпуса относятся к классу Lead Frame. Это подразумевает размещение кристалла на медном фрейме-теплоаккумуляторе, соединенном с соответствующим выводом модуля. Фреймы крепятся через изолирующий эпоксидный слой к теплоотводящему основанию (алюминий для модулей Mitsubishi, керамика для модулей Fairchild). В семействе модулей IR в настоящее время применяются корпуса с односторонним расположением выводов (типа SIP) нескольких типоразмеров (рис. 3). При дальнейшем расширении семейства в него войдут приборы в DIP-корпусах на более высокие токи.

Несмотря на более высокую нагрузочную способность по току DIP-корпуса, его недостатком является то, что возможен единственный вариант взаимного расположения платы управления и модуля (радиатора) — в параллельных плоскостях. У SIP-модуля этот недостаток легко устраняется различными вариантами заводской формовки выводов (рис. 4).

Помимо этого в модулях IR применена более прогрессивная технология корпусирования IMS (Insulated Metall Substrate). Она позволяет увеличить плотность монтажа до трех раз и снизить стоимость корпуса на 60% по сравнению с технологиями, используемыми в модулях-аналогах.

IMS-материал представляет собой фольгированный материал, где слой медной фольги отделен от алюминиевой подошвы тонким изолирующим адгезивным материалом с высокой теплопроводностью. После завершения процесса травления и монтажа компонентов внутреннее содержимое модуля напоминает печатную плату (рис. 5).

В модулях IR толщина фольгированного слоя составляет 20–70 мкм, толщина адгезивной пленки — 20 мкм, толщина подошвы из алюминия с двусторонним анодированием — 1,5–3 мм. В отличие от аналогов модули IR относятся к типу FullPack (полностью изолированные). После заливки компаундом внешняя поверхность подошвы покрывается слоем пластмассы толщиной 500 мкм.

Высокая эффективность — низкий уровень потерь

Аналоги модулей IR изначально проектировались с акцентом на промышленные приложения. Поэтому они производятся в двух вариантах: либо для работы на стандартных промышленных частотах ШИМ 3–4 кГц, либо на более высоких частотах, но не более 15 кГц. В балансе потерь мощности в этих модулях акцент был сделан на потери на проводимость. Повышение частоты ШИМ создает при принятых технологиях корпусирования дополнительные проблемы, связанные с ростом уровня создаваемых помех. Поэтому в модулях Mitsubishi применяются Trench IGBT,

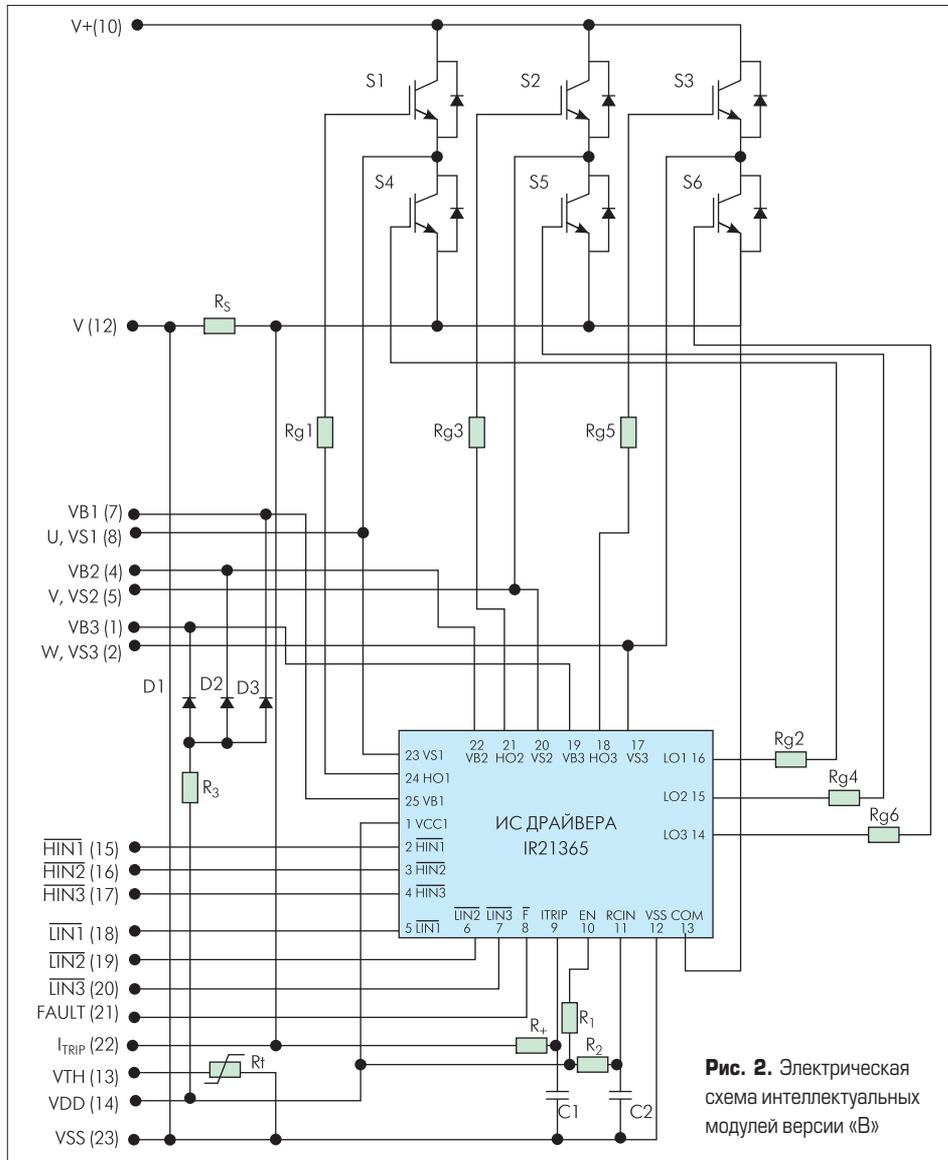


Рис. 2. Электрическая схема интеллектуальных модулей версии «В»



Рис. 3. Интеллектуальный модуль в корпусе типа SIP

а в модулях Fairchild — PT IGBT с низким напряжением падения на переходе. Модули IR, напротив, проектировались с учетом применения в промышленных и бытовых приводах, где требуются широкие диапазоны регулирования скорости, высокая динамическая точность, и в балансе потерь серьезное внимание уделяется потерям на переключение. Для достижения низких потерь на переключение в них применены NPT IGBT последнего поколения. По сравнению с транзисторами, используемыми в конкурентных модулях, IGBT, при-

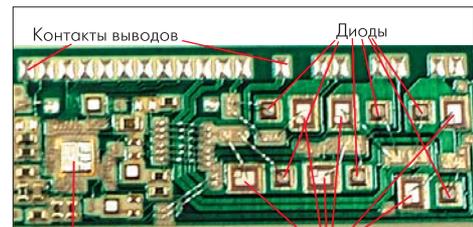


Рис. 5. Плата из IMS-материала с установленными компонентами модуля

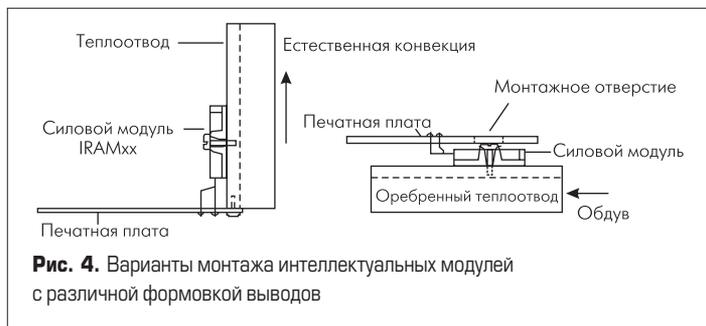


Рис. 4. Варианты монтажа интеллектуальных модулей с различной формовкой выводов

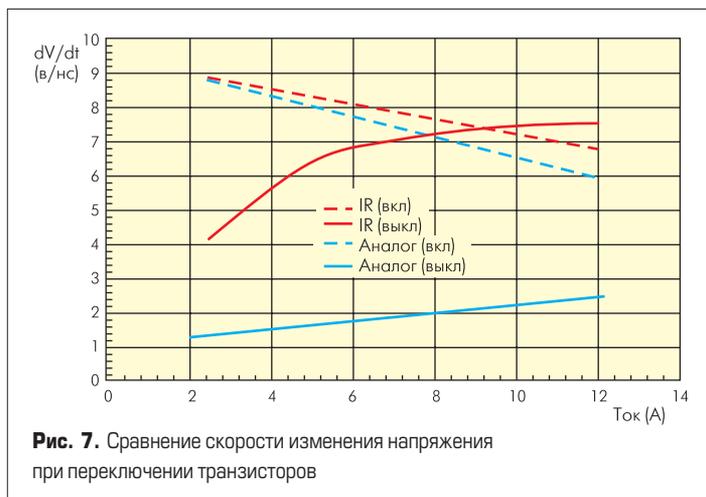


Рис. 7. Сравнение скорости изменения напряжения при переключении транзисторов

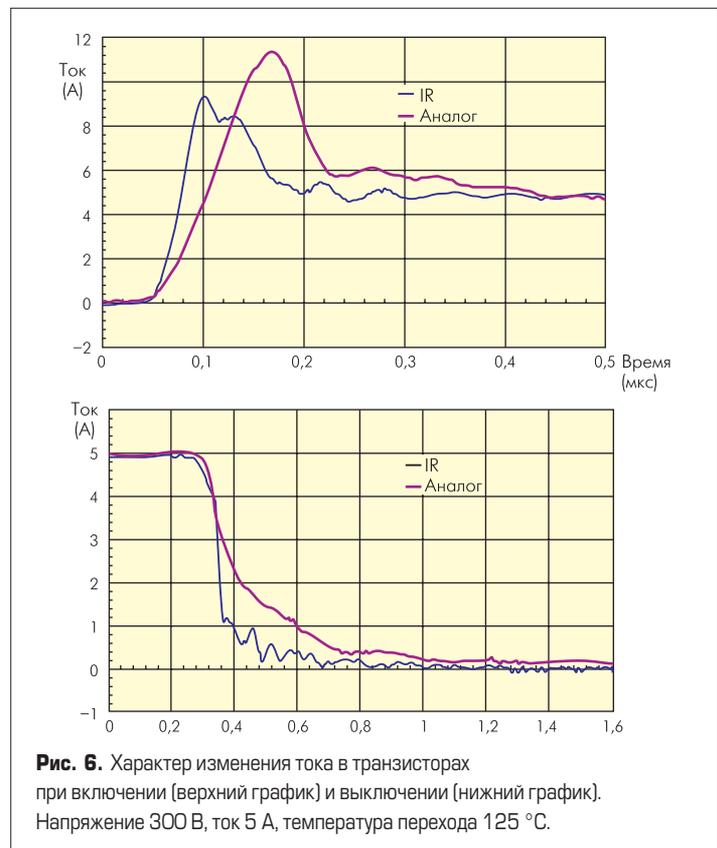


Рис. 6. Характер изменения тока в транзисторах при включении (верхний график) и выключении (нижний график). Напряжение 300 В, ток 5 А, температура перехода 125 °С.

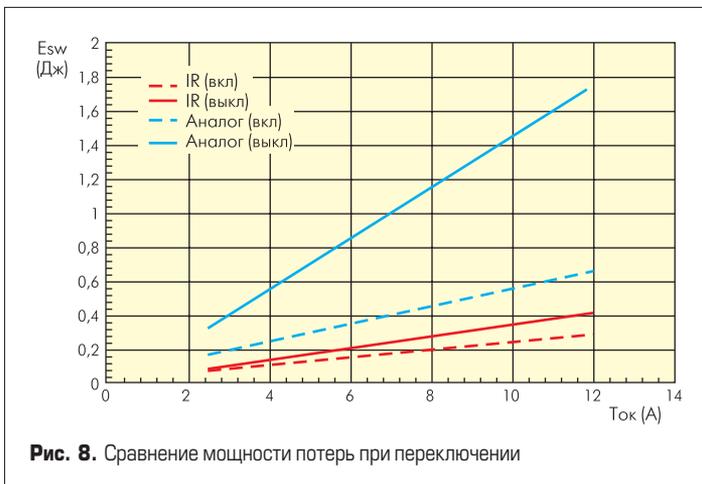


Рис. 8. Сравнение мощности потерь при переключении

Таблица 1. Сравнительная оценка усредненных потерь мощности

Производитель	Tj, °C	Pc, Вт	Psw, Вт	Pt, Вт	Pit, Вт
IR	25	1,70	0,63	2,33	18,10
Аналог	25	1,43	1,64	3,07	22,90
IR	125	1,89	1,02	2,91	21,30
Аналог	125	1,43	3,47	4,78	34,00

Примечание: Tj — температура кристалла; Pc, Psw, Pt — мощность потерь на проводимость, переключение и полная мощность потерь в IGBT-транзисторе; Pit — полная мощность потерь в инверторе.

меняемые в модулях IR, существенно быстрее включаются и выключаются (рис. 6) и, что наиболее важно, имеют гораздо более короткое время спада при выключении, определяющее в основном потери на переключение за счет гораздо более высокой скорости спада напряжения (рис. 7).

За счет этого IGBT-транзисторы IR имеют существенное преимущество перед аналогами по потерям на переключение (рис. 8), хотя и уступают им по падению напряжения, определяющему потери на проводимость (рис. 9).

Для сравнения эффективности модулей различных типов необходимо иметь методику определения комплексных потерь мощности в модуле в реальных условиях эксплуатации [1]. Она позволяет оценивать усредненные и мгновенные потери мощности на ключах инвертора с учетом потерь на диодах. С использованием этой методики были проведены сравнительные испытания модуля IR и аналога компании Fairchild при работе в приводе компрессора кондиционера. Оценка

мощности потерь проводилась в режиме полной нагрузки при напряжении на шине питания 390 В, среднем токе в двигателе 4 А, частоте ШИМ 7,8 кГц, частоте в двигателе 30 Гц, скважности ШИМ 0,8 в условиях принудительного обдува. Характер изменения мощности потерь в течение полупериода представлен на рис. 10.

Как следует из графиков, модуль IR имеет преимущество по потерям во всем диапазоне температур кристалла, причем с ростом температуры оно увеличивается и разрыв достигает 30%.

Оценка усредненных потерь мощности в ключе и инверторе дает аналогичную картину (табл. 1).

Несмотря на преимущество аналога по усредненной мощности потерь на проводимость на ключе, в структуре потерь на ключе и в инверторе определяющую роль играют потери на переключение.

Усредненная мощность потерь в модуле IR была ниже, чем у аналога, причем разрыв по потерям существенно увеличился с ростом температуры кристалла.

Низкий уровень генерируемых помех

Электрические соединения в модулях осуществляются с применением печатных плат и проводников разварки. Как правило, печатные платы имеют не более двух слоев, что связано с ограничением по цене. Для предотвращения протекания токов от силового узла к управляющей части по шинам нулевого потенциала используется метод объединения точек нулевого потенциала логики и силовой части в единой точке на нулевой шине. Наличие паразитных индуктивностей и емкостей между этими

точками приводит к генерации высокочастотных шумов при работе. Для обеспечения соответствия мощности генерируемых шумов требованиям стандартов во многих случаях приходится искусственно снижать частоту ШИМ. При использовании в модулях IMS-материалов металлическое теплоотводящее основание платы, обладающее хорошей электропроводностью, может быть использовано для реализации внутренней эквипотенциальной поверхности с нулевым потенциалом (EGP) вместо общей точки, электрическое соединение с которой можно осуществлять путем разварки. Распределенная между этой поверхностью и шиной питания емкость является проводником с низким импедансом для высокочастотных помех, генерируемых инвертором, что способствует эффективному снижению генерируемых шумов. Еще на момент подготовки к серийному производству предыдущего поколения силовых модулей семейства PowIRtrain, в которых впервые были использованы IMS-материалы, специалисты компании разработали методику эффективного снижения уровня паразитных факторов за счет оптимизации топологии печатной платы и схемы заземления. Как показали сравнительные испытания этих модулей и модулей, производимых по традиционным технологиям, уровень паразитных индуктивностей у модулей PowIRtrain был снижен почти на два порядка, что обеспечивало чрезвычайно высокое качество работы инвертора и низкий уровень генерируемых шумов. Усовершенствованные методы снижения мощности генерируемых шумов реализованы в новом семействе интеллектуальных модулей IR. Сравнительные испытания по оценке уровня

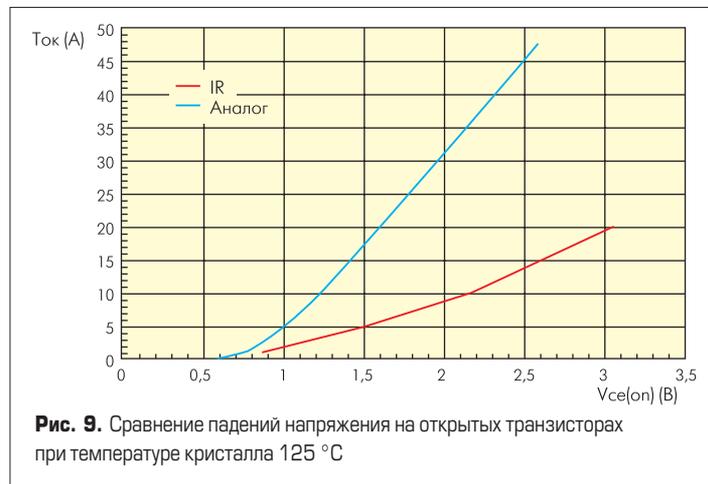


Рис. 9. Сравнение падений напряжения на открытых транзисторах при температуре кристалла 125 °C

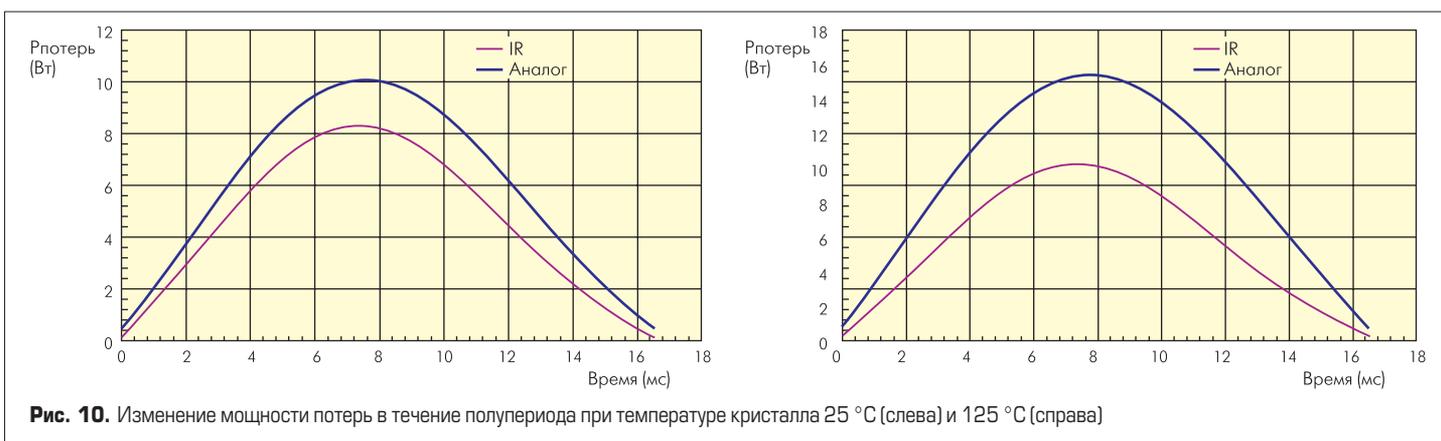


Рис. 10. Изменение мощности потерь в течение полупериода при температуре кристалла 25 °C (слева) и 125 °C (справа)

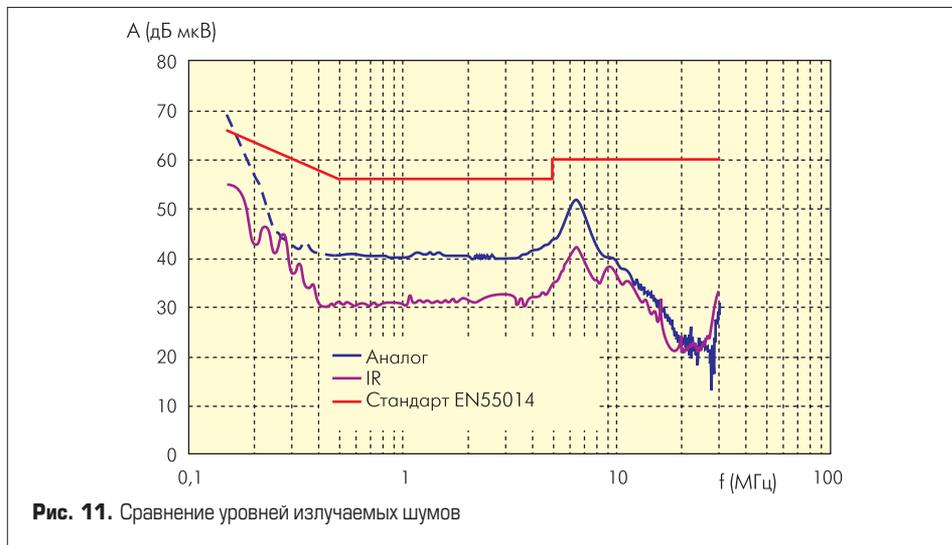


Рис. 11. Сравнение уровней излучаемых шумов

генерируемых шумов в инверторе привода компрессора кондиционера мощностью 1,4 кВт показали преимущество модуля IR в диапазоне частот до 5 МГц (рис. 11), что подтверждает эффективность использования IMS-материалов для снижения влияния паразитных факторов.

Простая схема подключения

Для реализации функционально законченного устройства управления трехфазным электродвигателем с применением интеллектуальных модулей требуется минимальное количество компонентов. Даже для версии «А» (рис. 12) помимо микроконтроллера требуется подключить к выводам модуля три бутстрепных конденсатора С1–С3, сетевой фильтр Сф1, Сф2, три шунта токовых ОС Rш1–Rш3 и несложный интерфейс на пассивных компонентах для передачи на микроконтроллер

информации о нештатных ситуациях (перегрев, перегрузка по току).

Состав серии интеллектуальных модулей IR и программа ее дальнейшего расширения

Номенклатура серийно выпускаемых интеллектуальных силовых модулей семейства IRAMxx представлена в таблице 2. В сетях переменного тока с диапазоном напряжения от 85 до 253 В эти модули обеспечивают управление трехфазными электродвигателями мощностью от 100 Вт до 2,2 кВт. Для обеспечения максимальной компактности и минимальной цены модули выпускаются в зависимости от величины нормируемого тока в трех типах SIP-корпусов.

Почти все модули семейства выпускаются с двумя вариантами формовки выводов (цифра «2» в обозначении — вариант формовки с отгибом на 90° по отношению к посадочной плоскости корпуса). Конструкция SIP-корпусов позволяет обеспечивать надежную эксплуатацию при питании от сетей переменного тока с напряжением до 380 В (шина постоянного тока 550 В). Сопротивление изоляции модулей нормировано на напряжение 2000 В. Температурный диапазон при эксплуатации и хранении составляет от -40 до +150 °С. В модулях варианта «В» применяются прецизионные безындуктивные шунты с предельным отклонением 1% и рассеиваемой мощностью от 1,5 до 4,5 Вт. Во всех модификациях модулей используется один типовой термистор с номинальным сопротивлением 100 кОм, максимальным отклонением 5% и температурным коэффициентом сопротивления 4250. Применяемый во всех типах модулей трехфазный драйвер IR21365 обеспечивает блокировку работы при низком напряжении сети, паузу 300 нс на переключение верхних и нижних ключей для исключения сквозных токов, синхронное отключение всех ключей инвертора спустя 750 нс после получения сигнала о перегреве или перегрузке по току. Помимо того, все 600-вольтовые IGBT-транзисторы инвертора нормируются на устойчивость к короткому замыканию (в режиме короткого замыкания выдерживают 10-кратный по отношению к номинальному ток в течение 10 мкс).

При выборе типомодуля модуля IR следует иметь в виду, что в отличие от аналогов они сохраняют высокую нагрузочную способность по току в широком диапазоне частот

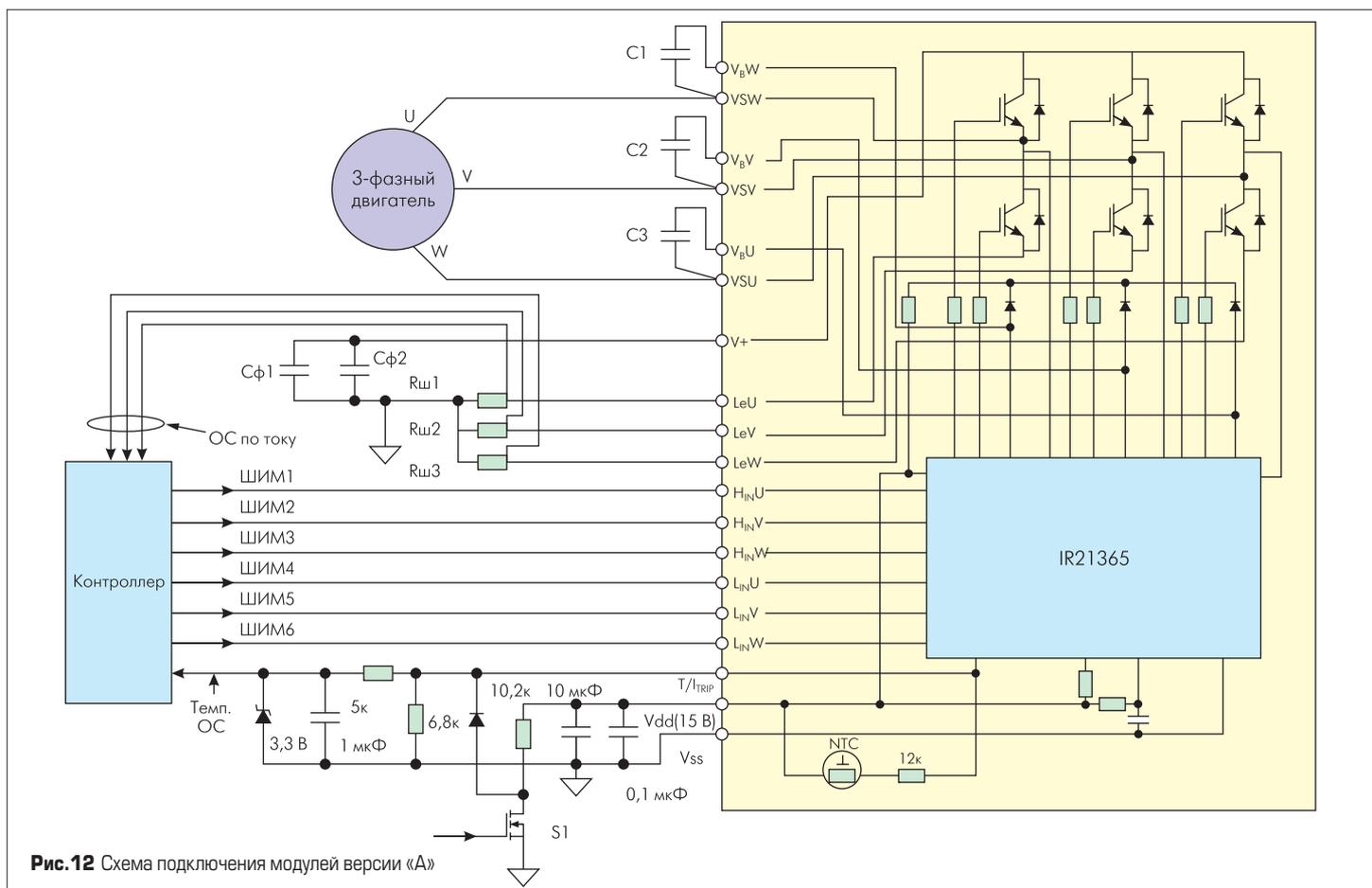


Рис. 12. Схема подключения модулей версии «А»

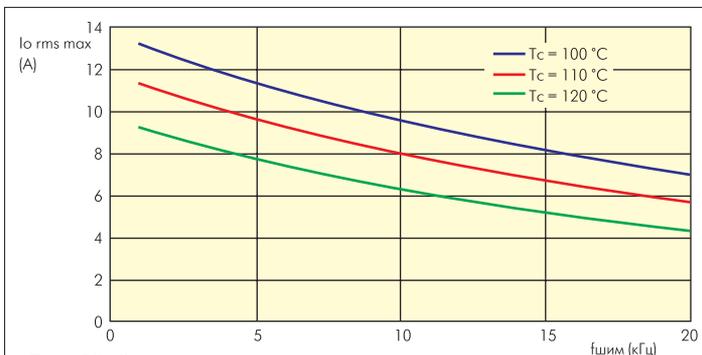


Рис. 13. Зависимость выходного тока от частоты и температуры корпуса (Ширины = 400 В, $T_j = 150^\circ\text{C}$, коэффициент мощности — 0,6, глубина модуляции — 0,8)

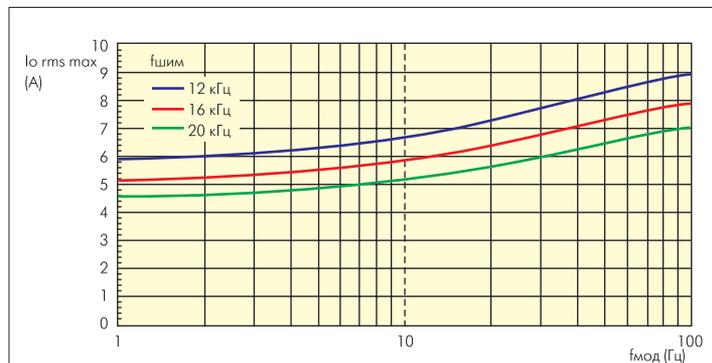


Рис. 14. Зависимость выходного тока от частоты модуляции в двигателе и частоты ШИМ

Таблица 2. Номенклатура интеллектуальных силовых модулей IRAMxx

Типономинал	P_m , кВт	I_o , А (25 °C)	I_o , А (100 °C)	P_d , Вт	Ф ШИМ, кГц	R_{sh} , мОм	R_t , кОм	$R_{th}(J-C)$, °C/Вт	Тип корпуса	Размеры корпуса, мм
IRAMS06UP60A	0,10–0,50	6	3	20	20	–	100	4,2	SIP1	62×22,3×5
IRAMS06UP60A-2	0,10–0,50	6	3	20	20	–	100	4,2	SIP1	62×22,3×5
IRAMS06UP60B	0,10–0,50	6	3	20	20	50	100	4,2	SIP1	62×22,3×5
IRAMS06UP60B-2	0,10–0,50	6	3	20	20	50	100	4,2	SIP1	62×22,3×5
IRAMS10UP60A	0,40–0,75	10	5	20	20	–	100	4,2	SIP1	62×22,3×5
IRAMS10UP60A-2	0,40–0,75	10	5	20	20	–	100	4,2	SIP1	62×22,3×5
IRAMS10UP60B	0,40–0,75	10	5	20	20	33	100	4,2	SIP1	62×22,3×5
IRAMS10UP60B-2	0,40–0,75	10	5	20	20	33	100	4,2	SIP1	62×22,3×5
IRAMX16UP60A	0,75–2,00	16	8	35	20	–	100	4,0	SIP2	62×29×5,5
IRAMX16UP60A-2	0,75–2,00	16	8	68	20	–	100	4,0	SIP2	62×29×5,5
IRAMY20UP60B	0,75–2,20	20	10	68	20	17	100	1,6	SIP3	78×31,6×6

Примечание: P_m — мощность электродвигателя (при напряжении сети ~85 и ~253 В),

P_d — максимальная мощность, рассеиваемая модулем на одну фазу, I_o — среднеквадратический выходной ток (ток фазы двигателя), $f_{шмм}$ — максимальная частота ШИМ, R_{sh} — сопротивление шунта,

R_t — сопротивление термистора, $R_{th}(J-C)$ — тепловое сопротивление «кристалл — корпус».

ШИМ и модуляции в двигателе и, кроме того, по-иному нормируются. Модули-аналоги нормируются по току на постоянном токе. В отличие от них модули IR нормируются по току при предельных режимах — максимальной частоте ШИМ (20 кГц), максимальном напряжении на шине питания, максимальной глубине модуляции, более высокой температуре кристалла (150 °C). Справочные листы модулей IR содержат информацию о зависимости максимального выходного тока от частоты ШИМ и частоты модуляции в двигателе при различных температурах корпуса (рис. 13, 14), что значительно упрощает конструктору задачу выбора рабочих режимов.

Как следует из графиков, реальная нагрузочная способность по току модулей IR может возрасти вдвое при снижении частоты ШИМ

и на 50% — при повышении частоты модуляции в двигателе.

В реальных приложениях модули IR, нормированные на меньший по сравнению с аналогами ток, могут иметь преимущество по выходному току, особенно с повышением частоты ШИМ. На рис. 15 представлены зависимости максимального синусоидального тока на выходе модуля (ток фазы двигателя) в зависимости от частоты ШИМ. Сравнение проводилось между интеллектуальными модулями компании International Rectifier, ультрабыстрыми интеллектуальными модулями 4-го поколения компании Mitsubishi и ультрабыстрыми интеллектуальными модулями компании Fairchild при максимально допустимой температуре кристалла (150 °C для модулей IR и 125 °C для остальных). Как следует из графиков, модуль

FSAM20SH60A компании Fairchild, нормированный на ток 20 А, значительно уступает по выходному току модулю IRAMY20UP60A компании IR, нормированному на такой же ток, и фактически близок по току к 16-амперному модулю IR IRAMX16UP60A. Нормированный на 15 А модуль PS21964-A компании Mitsubishi существенно уступает 16-амперному IRAMX16UP60A компании IR. На частотах ШИМ выше 10 кГц он уже равноценен 10-амперному IRAMS10UP60A, который, в свою очередь, превосходит 10-амперный PS21963-A компании Mitsubishi во всем диапазоне частот ШИМ.

В настоящее время номенклатура интеллектуальных модулей IR находится в процессе формирования. Компанией разработана программа ее значительного расширения. С этой целью на первом этапе будет расширена номенклатура SIP-корпусов с меньшими габаритами для увеличения диапазона мощностей в сторону понижения мощности. В номенклатуру модулей будет введена серия в DIP-корпусах нескольких типоразмеров для повышения выходного тока и расширения диапазона мощности до 3,7 кВт. Планируется ввод в номенклатуру серии 1200-В модулей для промышленного привода с питанием от трехфазной сети с напряжением 380 В. На втором этапе планируется расширение номенклатуры за счет ввода в нее модулей с повышенным уровнем интеграции, содержащих дополнительно в различных сочетаниях тормозной ключ с управлением, входной выпрямительный мост, корректор коэффициента мощности, а в дальнейшем — безмостовой активный входной каскад, заменяющий выпрямительный мост и корректор коэффициента мощности.

Литература

1. Battelo M., Wood P., Hezi M., Guerra A. A new flexible low-cost IGBT inverter power module for appliance applications. PCIM. 2003.
2. Gorderino A., Guerra A. Application-specific current rating of advanced power modules for motion control. Power Systems World. 2003.
3. IRAM series application overview. Application note AN-1044. IR. 2003.
4. Smart power module user's guide. Application note AN-9018. Fairchild. 2002.
5. DIP-IPM Ver.4 application note. Mitsubishi. 2005.

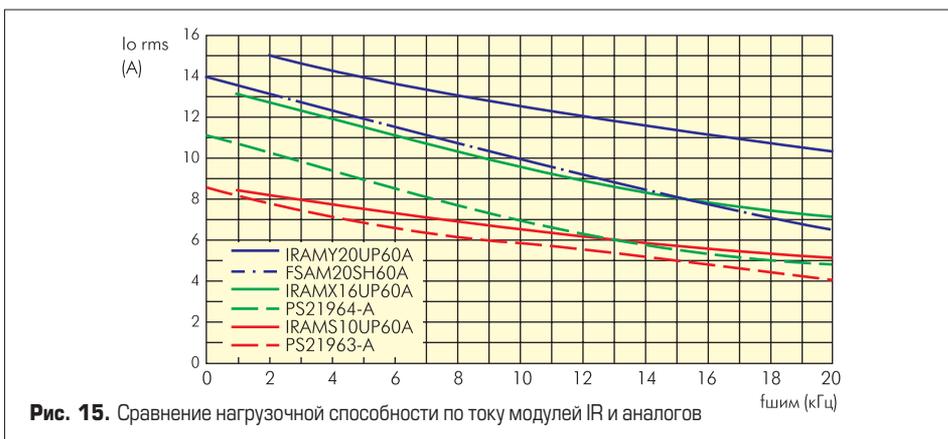


Рис. 15. Сравнение нагрузочной способности по току модулей IR и аналогов