

Построение частотно-регулируемых электроприводов средней мощности

на основе электронных компонентов, производимых International Rectifier

Кирилл Автушенко

Алексей Попов

Сергей Попов

По различным оценкам, 40–60% всей вырабатываемой в мире электроэнергии потребляется системами электропривода [1, 2]. Области их применения многообразны, а мощности составляют от нескольких ватт до десятков мегаватт. Оптимизация работы электроприводов, улучшение их характеристик является магистральным направлением экономии электроэнергии [3], а основное средство совершенствования — переход к регулируемым по частоте вращения приводам. Это обеспечивает серьезный выигрыш даже в машинах, предназначенных для прокачки жидких или газообразных сред (насосы, воздухоудувки). Еще больший эффект достигается в приводах для точного позиционирования или стабилизации скорости [2]. Расчеты показывают, что простая замена нерегулируемого привода на регулируемый позволяет экономить до 60% электроэнергии, потребляемой бытовыми холодильниками и кондиционерами, и до 64% — стиральными машинами [1]. Вопросы возможного выигрыша по энергопотреблению в самых разных областях применения при переходе к использованию регулируемых электроприводов подробно рассматриваются в [3–5].

Типы двигателей и методы управления ими

Возможны принципиально различные варианты построения электроприводов с регулируемой частотой вращения. Сравнительно просто это можно было бы сделать, применяя электромшины постоянного тока. Но их относительно невысокая надежность, ограниченный ресурс работы и повышенные затраты на обслуживание сильно лимитируют диапазон рациональных областей применения электроприводов постоянного тока. По соображениям максимальной надежности и минимальных расходов на приобретение и эксплуатацию при питании от сетей переменного тока общего пользования наи-

более привлекательны асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (АД КЗР). Но это машины, которые по своему принципу тяжело поддаются регулированию скорости. Для изменения частоты вращения приводов на основе АД:

- варьируют действующее значение напряжения на статоре (что приводит к значительному ухудшению КПД);
- переключают схему соединения катушек статорных обмоток АД КЗР, изменяя число полюсов электромшины (так можно получить несколько фиксированных скоростей без ухудшения КПД, но конструкция двигателя получается значительно сложнее и падают его удельные показатели);
- используют двигатель с фазным ротором (к обмоткам ротора через токосъемные кольца подключаются добавочные резисторы или, если нужно иметь удовлетворительный КПД, рекуперирующий преобразователь) [3].

Как видно, у всех вышеуказанных способов регулирования частоты вращения имеются очень серьезные недостатки.

Одновременное достижение высокого КПД вместе с широким диапазоном перестройки и высокой точностью стабилизации скорости достигается применением частотно-регулируемого электропривода (ЧРП): статический инвертор питает многофазную машину переменного тока, одновременно перестраивая подаваемое на ее статор напряжение и частоту для получения желаемого режима работы электродвигателя. Наиболее высокие характеристики и универсальность применения достигаются при использовании ЧРП с явно выраженным промежуточным звеном постоянного тока (постоянного напряжения), структура которого показана на рис. 1. Накопительный конденсатор (или дроссель — для приводов большой мощности [6]) на шине постоянного тока выполняет очень важную роль, отделяя инвертор вместе с электродвигателем от питающей сети по реактивной и мгновенной мощности, а так-

же защита от сетевых перенапряжений [7] и ограничивая высшие гармоники потребляемого тока [8]. Хотя стоимость ЧРП такой структуры относительно велика, его хорошие потребительские свойства обусловили наиболее широкое применение, особенно в приводах малой и средней мощности [1, 9]. В приводах особо большой мощности (несколько мегаватт) широко используются непосредственные преобразователи частоты (без промежуточного звена постоянного тока).

Применяя ЧРП, в качестве электродвигателя можно использовать не только АД КЗР, но и синхронные машины, которые обеспечивают более высокий КПД электромеханического преобразования [10]. Особенно интересны синхронные двигатели с постоянными магнитами и синхронные реактивные двигатели. При этом возможно построение ЧРП как с синусоидальной формой напряжения на статорных обмотках (вентильные двигатели), так и с трапецидальной противо-ЭДС (бесконтактные двигатели постоянного тока). Последние позволяют использовать особенно простые преобразователи, работающие с невысокой частотой коммутации силовых транзисторных ключей, что обеспечивает хороший КПД и низкую стоимость ЧРП. Преимущества использования ЧРП многообразны:

- можно применять недорогие, неприхотливые и надежные стандартные трехфазные АД КЗР при питании привода от однофазной сети;
- можно достичь коэффициента мощности нагрузки (электропривода), равного 1 (у АД КЗР в составе нерегулируемого электропривода $\cos\phi$ ощутимо меньше 1);
- можно обеспечить частоту вращения ротора электродвигателя свыше 3000 об/мин. — предельно возможная скорость у нерегулируемого привода переменного тока при питании от сети 50 Гц, причем даже в случае применения многополюсных машин, которые более эффективны в конструктивном отношении, чем двухполюсные;
- эффективное ограничение механических перегрузок и безопасное отключение привода при аварии;

- наилучшее использование электродвигателя в переходных режимах (например, можно получить пусковой момент АД КЗР, равный максимальному, и т. п.), а также увеличение срока службы оборудования.

В составе ЧРП находят применение как стандартные типы электродвигателей, так и специально спроектированные для этого машины: высокоскоростные, с повышенной электрической прочностью изоляции, особенно в части стойкости к импульсным перенапряжениям, адаптированные к высоким уровням гармоник в токе и напряжении [11].

Для массового применения критически важно уменьшить себестоимость разработки, производства и эксплуатации ЧРП до приемлемо малого уровня, и эта задача уже во многом решена. Зачастую срок окупаемости применения ЧРП составляет меньше одного года. Малые затраты на разработку и возможность использовать их даже в изделиях, выпускаемых малыми сериями, достигаются применением платформенного подхода, что особенно эффективно для небольших мощностей приводов и высоко интегрированных решений с высокими технико-экономическими характеристиками [1, 10, 12]. Это также обеспечивает и снижение себестоимости изготовления ЧРП. Наиболее массовыми являются приводы малой (до 5 кВт) мощности, на долю которых приходится до 75% рынка электроприводов [1]. Для их построения International Rectifier (IR) предлагает широкий спектр модулей IRAM, позволяющих создавать эффективные ЧРП мощностью от нескольких десятков ватт до 2–3 кВт, работающие от сети 230 В, в т. ч. с активным корректором коэффициента мощности на входе. Они подробно рассмотрены в [12, 13].

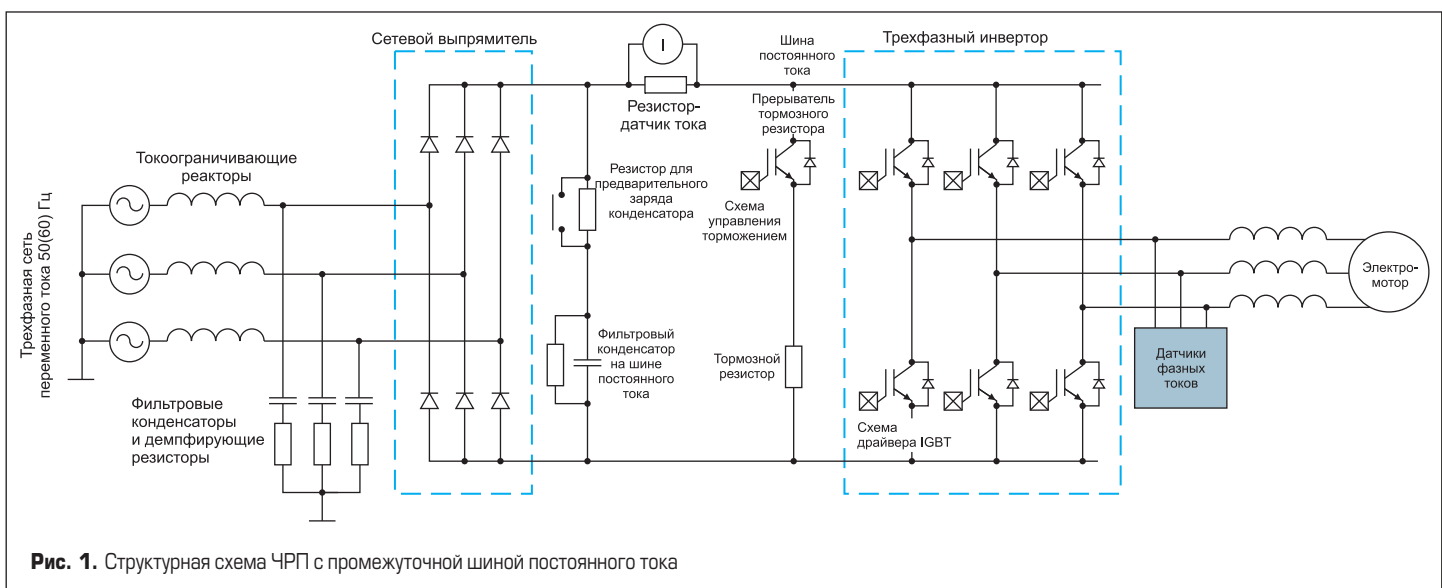
Требования, предъявляемые к системе электропривода и ее компонентам

Для приводов мощностью более 3 кВт, как правило, требуется питание от трехфазной сети 380 В. Соответственно, напряжение на промежуточной шине постоянного тока

составляет примерно 500–600 В (рис. 1) с возможностью кратковременного повышения до 800–1000 В (более сильные перенапряжения должны устраняться специализированной подсистемой ограничения). Целесообразные частоты коммутации подобных ЧРП лежат в диапазонах 5–10 кГц (для тех сфер применений, где недопустим акустический шум) или 2–4 кГц (если нет явных ограничений на шум и особенно при повышенных мощностях) [14], хотя при необходимости возможна работа и на более высоких частотах [15, 16].

В таких ЧРП используются силовые ключи 12-го класса ($U_{\text{блок ном}} = 1200 \text{ В}$) [17], при условии, что выброс напряжения при выключении эффективно ограничен (даже в условиях короткого замыкания (КЗ)), а система управления запирает инвертор при опасных перенапряжениях на шине постоянного тока. Другое основополагающее требование к IGBT в составе ЧРП — стойкость к КЗ в нагрузке. Она нормируется по длительности интервала времени t_{sc} в течение которого транзистор способен гарантированно выдержать условия КЗ. Время t_{sc} учитывается в системе управления для обнаружения перегрузки и подачи команды на отключение выходного силового каскада. Все IGBT, выпускаемые IR для применения в электроприводе, имеют $t_{\text{scод}} = 10 \text{ мкс}$. Некоторые конкурирующие IGBT обеспечивают защиту лишь в течение 5 мкс, что налагает серьезные ограничения на быстродействие внешней системы защиты от КЗ.

Номинальный рабочий ток инвертора и, соответственно, мощность ЧРП реально ограничиваются приемлемой величиной потерь в силовых ключах. При оптимизации проекта допустимые потери определяются теплоотводящей способностью системы охлаждения ключей, ее адекватной стоимостью и габаритами, максимально допустимой температурой кристалла IGBT и режимом работы привода. Вопросы определения потерь в современных IGBT-ключках и выбора наиболее адекватных решений подробно рассмотрены в работах [16, 17]. Наибольшее значение имеют потери в проводящем состоянии $P_{\text{пров}}$ и коммутационные потери при включении и выключении



силового ключа ($E_{\text{вкл}} + E_{\text{выкл}}$). Рациональная область частот применения того или иного ключа определяется формулой $F_k = (0,5-1) \times P_{\text{пров}} / (W_{\text{вкл}} + W_{\text{выкл}})$. В общем случае рациональные частоты применения IGBT ощутимо ниже, чем у силовых MOSFET. Но на «своих» частотах IGBT имеют безоговорочное преимущество перед MOSFET: более высокая токнесущая способность, меньшие потери и цена.

Применительно к ЧРП средней мощности возможность использования в них кремниевых MOSFET 12-го класса закрывается из-за очень плохих характеристик встроенных антипараллельных диодов [16, 18]. Помимо медленного восстановления блокирующих свойств после протекания через них прямого тока и малой стойкости к быстрому нарастанию напряжения, эти диоды крайне сложно эффективно зашунтировать внешним, параллельно включенным диодом. Практически не остается ничего другого, как отсекать весь MOSFET включенным последовательно с ним низковольтным диодом Шоттки (встречно паразитному диоду MOSFET) и уже параллельно этой цепочке силовых приборов подключать быстродействующий замыкающий диод. Понятно, что ни по потерям в режиме проводимости, ни по стоимости, ни по паразитным параметрам монтажа такой гибрид не может конкурировать с IGBT. Для применения в инверторах выпускаются как одиночные IGBT (Single-pack, Discrete), так и интегрированные — когда в одном корпусе располагаются кристалл IGBT и кристалл быстродействующего антипараллельного диода (Co-pack). При необходимости работы с большими токами нагрузки возможно как параллельное включение нескольких дискретных IGBT, так и применение силовых модулей, в которых кристаллы IGBT совместно с кристаллом высоковольтного драйвера располагаются в специальном силовом многовыводном корпусе. Такое решение обеспечивает хороший теплоотвод и дополнительные защитные функции. Подробно такие решения рассмотрены в [12].

При проектировании IGBT для применения в ЧРП проводят оптимизацию по трем основным критериям: получение минимального падения напряжения на открытом транзисторе, достижение минимальных коммутационных потерь и обеспечение требуемой стойкости к КЗ [18]. Это — взаимно противоречащие задачи, и конечное решение представляет собой наилучший компромисс в рамках возможностей, предоставляемых технологиями изготовления IGBT. Компания IR имеет, пожалуй, наибольший опыт разработки и производства высококачественных IGBT. Для применения в составе электропривода компания предлагает три конструктивно-технологических поколения IGBT 12-го класса.

Силовые ключи (IGBT) от IR для электропривода

Транзисторы поколения Gen4 (PT IGBT), разработанные полтора десятилетия тому назад по технологии punch through, все еще

не утратили своей актуальности (поперечный разрез чипа изображен на рис. 2). Они изготовлены на сильнолегированных подложках стандартной толщины, что определяет их сравнительно невысокую себестоимость производства. Такие IGBT имеют повышенное тепловое сопротивление, вынужденно небольшую плотность прямого тока, а также сильное ухудшение потерь выключения при увеличении температуры кристалла. Эти недостатки приходится компенсировать использованием чипов большой площади. Прямое падение напряжения таких IGBT уменьшается с температурой, что благоприятно сказывается на тепловом режиме работы, но делает крайне проблематичной возможность их параллельного включения. Применение IGBT Gen4 наиболее рационально в ЧРП минимальной стоимости с невысокой частотой коммутации.

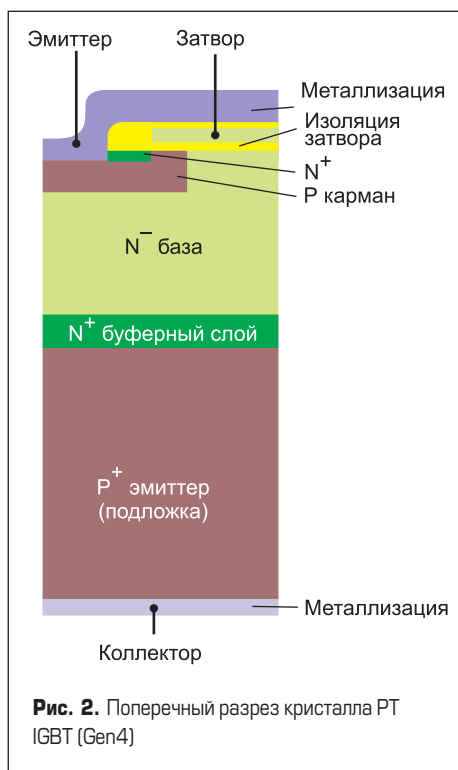


Рис. 2. Поперечный разрез кристалла PT IGBT (Gen4)

Транзисторы поколения Gen5 (NPT IGBT — non punch through) разработаны около десяти лет тому назад и используют подложки уменьшенной толщины (рис. 3). Им в полной мере присущи достоинства, характерные для всех NPT IGBT: малое увеличение энергии потерь выключения с ростом температуры, малый разброс значений параметров ключа (что благоприятно как в отношении параллельного включения нескольких приборов, так и с точки зрения их применения в массово выпускаемых ЧРП), несильно выраженная проблема «хвоста» тока при выключении. С другой стороны, имеются традиционные проблемы NPT IGBT: большее прямое падение напряжения и его значительное увеличение с ростом температуры (это упрощает параллельное включение, но неблагоприятно влияет на тепловой режим), сравнительно большая емкость «затвор-коллектор» и, соответственно, отношение ($C_{3к}/C_{3з}$),

что делает эти IGBT склонными к паразитному отпиранию при больших быстрых перепадах напряжения $U_{кз}$ в силовой цепи [19]. Для большей гибкости применения IR разработала две модификации технологического процесса изготовления NPT IGBT 12-го класса 5-го поколения: оптимизированные на получение минимальных коммутационных потерь (для ЧРП с повышенной частотой переключений СТК) и более сбалансированные в отношении статических и динамических потерь. Применение IGBT 5-го поколения наиболее целесообразно в ЧРП средней мощности с повышенной частотой коммутации 10–20 кГц.

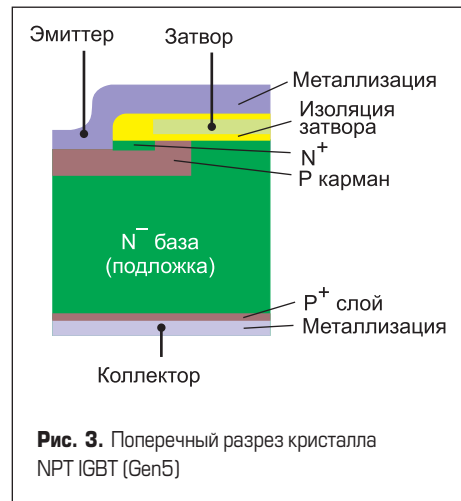


Рис. 3. Поперечный разрез кристалла NPT IGBT (Gen5)

IGBT 7-го поколения изготовлены по наиболее прогрессивной на сегодня технологии обработки особо тонких пластин из кремния с применением Trench-MOSFET структуры и оптимизированным профилем легирования кристалла (рис. 4). Это обеспечивает хороший баланс характеристик приборов как в режиме проводимости тока, так и при переключениях. Все важнейшие характеристики IGBT подвергаются 100%-ному контролю на приемосдаточных испытаниях, причем установлены достаточно жесткие нормы годности. По завершении испытаний все приборы проверяются на отключение тока коллектора, вчетверо превышающего $I_{к ном}$ при напряжении ограничения $U_{кз орг} = 960$ В. Такой жесткий

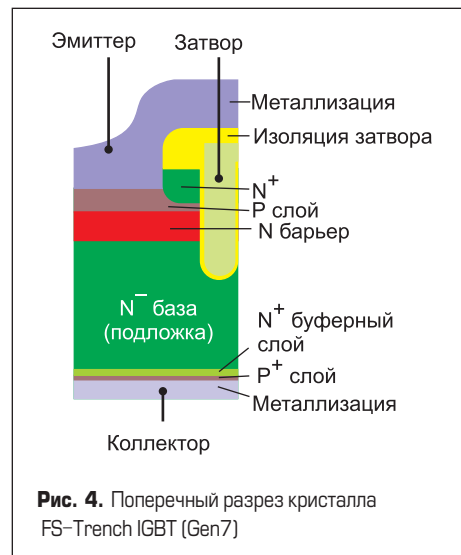


Рис. 4. Поперечный разрез кристалла FS-Trench IGBT (Gen7)

тест способны пройти только реально качественные приборы, не имеющие каких-либо слабых мест в своей конструкции [15]. В отличие от большинства конкурентов, IR выделила IGBT, имеющие нормированную стойкость к КЗ в цепи нагрузки, в самостоятельную линейку приборов. Это позволило получить хороший компромисс свойств IGBT [16]. $U_{кз\ пров}$ IGBT 7-го поколения имеет небольшой положительный температурный коэффициент. Он не сильно увеличивает потери режима проводимости при нагреве, совершенно безопасен в отношении электро-теплового разгона, но эффективно обеспечивает симметрирование режимов работы при параллельном включении нескольких транзисторов. Старшие модели серии отличаются весьма большими значениями токов, с которыми они могут работать. Например, IRG7PSH73K10 в корпусе Super247 имеет номинальный ток 75 А (максимальный ток при температуре корпуса +100 °С составляет 130 А) и может заменять несколько параллельно включенных дискретных приборов. Повышение предельно допустимой температуры кристалла IGBT 7-го поколения до +175 °С (у большинства конкурентов только +150 °С) очень эффективно (на 20–30%) увеличивает допустимую рассеиваемую мощность приборов, их токонесящую способность и частотный потенциал. Для наиболее полного раскрытия преимуществ высокой допустимой температуры целесообразно применение Single-IGBT и высококачественных внешних замыкаю-

щих диодов [15]. Использование тонких чипов уменьшило тепловое сопротивление между наиболее горячей областью кристалла и медным основанием прибора, а также снизило термомеханические напряжения в конструкции, что улучшает стойкость этих IGBT при циклических режимах нагрузки.

В таблице 1 представлены характеристики IGBT 12-го класса, выпускаемых IR для применения в ЧПП. Как было отмечено выше, все IGBT компании IR, предназначенные для применения в системе частотного электропривода, имеют диапазон рабочих частот 8–30 кГц и область безопасной работы в режиме КЗ шириной 10 мкс. Широкий выбор IGBT производства IR позволяет разработчикам и изготовителям ЧПП выбрать наиболее адекватные по параметрам приборы, а также оптимизировать продукцию по частоте коммутации.

Уникальным преимуществом всех IGBT производства IR является 100%-ное тестирование всех приборов на значение величин $E_{вкл}$ и $E_{выкл}$ при приемо-сдаточных испытаниях. Большинство других изготовителей IGBT приводят только типовые характеристики коммутационных потерь. Это лишает разработчика преобразователя, применяющего IGBT, возможности оценить, какой режим работы ключа может быть в худшем случае и останется ли он в допустимых для прибора пределах. Еще сложнее ситуация для производителя: он поставлен перед необходимостью организации собственного

входного контроля этих параметров, причем остается неопределенность в установлении пороговых значений. Что делать, если значительное количество приборов будет отбраковано на входном контроле? Ведь даже нет формальных оснований для предъявления претензий изготовителю или поставщику IGBT! Кроме того, если оговорены только типовые характеристики IGBT, исключена возможность отличить «правильные» приборы от подделок.

Высоковольтные ИМС для управления IGBT

Хорошие технико-экономические характеристики драйверов силовых ключей являются необходимой составляющей построения эффективного ЧПП. Для создания трехфазного автономного инвертора напряжения, работающего от промежуточной цепи постоянного тока 500–600 В и использующего IGBT с допустимым блокирующим напряжением 1200 В, IR предлагает интегральные микросхемы (ИМС) драйверов IR2213, IR2214, IR2233, IR2235, IR2238 и ИМС датчиков фазных токов IR2277 и IR22771. Все вышеуказанные микросхемы используют бутстрепное питание верхнего плеча. По сравнению с альтернативными решениями (специальные источники питания с гальванической развязкой входа и выхода на соответствующее напряжение и с малой проходной емкостью, диодно-емкостные умножители напряжения — «зарядовые насосы», раз-

Таблица 1. Характеристики IGBT 12-го класса от IR для электропривода

Наименование IGBT	Исполнение	Корпус	$I_c, A (T_c = +25 °C)$	$I_c, A (T_c = +100 °C)$	$V_{ce(он) тип.}, В$	$V_{ce(он) макс.}, В$	Технология	Энергия переключения $E_{тс тип.}, мДж$	Энергия переключения $E_{тс макс.}, мДж$	Прямое напряжение диода $V_{f тип.}, В$
IRGB5B120KD	Co-pack	TO-220	12	6	2,75	3,00	NPT	0,72	0,88	2,13
IRG4PH20KD	Co-pack	TO-247	11	5	3,17	4,30	PT	0,92	1,20	2,50
IRG4PH30KD	Co-pack	TO-247	20	10	3,10	4,20	PT	2,10	2,60	3,40
IRG4PH40KD	Co-pack	TO-247	30	15	2,74	3,40	PT	2,43	2,80	2,60
IRG7PH30K10D	Co-pack	TO-247	30	16	2,05	2,35	FS Trench	0,91	1,36	2,00
IRGP20B120UD-E	Co-pack	TO-247	40	20	3,05	3,45	NPT	1,28	1,80	1,67
IRG4PH50KD	Co-pack	TO-247	45	24	2,77	3,50	PT	5,73	7,90	2,50
IRG7PH37K10D	Co-pack	TO-247	40	25	1,90	2,20	FS Trench	1,60	2,70	2,50
IRGP30B120KD	Co-pack	TO-247	60	30	2,46	2,66	NPT	2,56	3,05	1,86
IRG7PH44K10D	Co-pack	TO-247	70	40	1,90	2,20	FS Trench	3,40	5,20	2,50
IRG7PH50K10D	Co-pack	TO-247	85	50	1,90	2,20	FS Trench	4,20	6,00	2,50
IRGPS40B120UD	Co-pack	Super TO-247	80	40	3,12	3,40	NPT	3,05	3,80	2,03
IRG4PSH71KD	Co-pack	Super TO-247	78	42	2,97	3,90	PT	8,90	11,60	2,50
IRGPS60B120KD	Co-pack	Super TO-247	105	60	2,50	2,75	NPT	8,00	10,32	1,93
IRG7PSH54K10D	Co-pack	Super TO-247	100	75	1,90	2,20	FS Trench	7,60	9,40	2,50
IRG4BH20K-S	Single-Pack	TO-220	11	5	3,17	4,30	PT	0,89	1,20	-
IRG4PH20K	Single-Pack	TO-247	11	5	3,17	4,30	PT	0,89	1,20	-
IRG4PH30K	Single-Pack	TO-247	20	10	3,10	4,20	PT	1,56	2,40	-
IRG4PH40K	Single-Pack	TO-247	30	15	2,74	3,40	PT	2,39	2,90	-
IRG7PH30K10	Single-Pack	TO-247	33	23	2,05	2,35	FS Trench	0,91	1,36	-
IRG4PH50K	Single-Pack	TO-247	45	24	2,43	3,50	PT	3,46	4,10	-
IRG4PSH71K	Single-Pack	Super TO-247	78	42	2,97	3,90	PT	5,49	8,30	-
IRG7PSH73K10	Single-Pack	Super TO-247	220	130	2,00	2,30	FS Trench	12,30	14,30	-

личные варианты применения импульсных трансформаторов), этот подход обеспечивает минимальные размеры и стоимость драйвера при достаточно высокой стойкости к быстрым изменениям напряжения (до 50 В/нс) и способность работать при изменении длительности коммутационных импульсов в широких пределах.

Для передачи информации внутри ИМС, между блоками, имеющими разные потенциалы, используется хорошо себя зарекомендовавшая схемотехника двухфазных импульсных «сдвигателей уровня» логических сигналов, мало потребляющих и не требующих для своей работы гальванической развязки. При рациональном размещении силовых и управляющих компонентов инвертора и правильной трассировке межсоединений на печатной плате, а также соблюдении известных правил выбора величин компонентов, обеспечивается надежная работа инвертора вплоть до мощностей в несколько десятков киловатт. Общая методика проектирования инвертора с применением ИМС драйверов от IR подробно изложена в [19], а особенности реализации трехфазных мостовых ЧРП — в [20]. Дополнительные полезные схемотехнические приемы борьбы с известной проблемой выброса напряжения на средней точке силовой стойки инвертора значительно ниже уровня общей шины ИМС, которые могут потребоваться в особо тяжелых случаях (высокая мощность ЧРП, работа при повышенной частоте ШИМ), рассмотрены в [21, 22].

Среди вышперечисленных ИМС на 1200 В IR2213 и IR2214 представляют собой драйверы отдельных полумостов, в то время как IR2233, IR2235 и IR2238 являются решениями для построения трехфазных мостовых инверторов. Основные характеристики ИМС трехфазных драйверов представлены в таблице 2. Хотя полумостовые драйверы позволяют обеспечить значительно большие токи управления затворами IGBT (типичные величины 2–2,5 А), реализация на их основе трехфазных инверторов менее целесообразна. Трехфазные драйверы обеспечивают более низкие токи затвора — 200–220 мА на включение, 420–460 мА — на выключение IGBT, но в них интегрировано большинство необходимых функций защиты и управления, причем очень важно, что они одновременно распространяются на все три фазы, с гарантированно точным согласованием параметров. Для управления IGBT с большими размерами чипа и, соответственно, значительным зарядом переключения (несколько сотен нанокюлон) ИМС трехфазных драйверов целесообразно усилить выходными буферными каскадами, рассматриваемыми в [19]. Это позволяет не только

получить токи управления до нескольких десятков ампер, но и упростить проблемы конструирования печатной платы инвертора. В случае трудно разрешимых проблем, обусловленных частичным проникновением токов из силовой минусовой шины в общий провод входных логических сигналов ИМС, не следует пренебрегать использованием развязки по входу с помощью недорогих быстродействующих оптронов [20]. К ним не предъявляется сколько-нибудь серьезных требований по допустимой величине напряжения изоляции, и поэтому могут быть использованы малогабаритные многоканальные оптроны (инженеры IR предлагают использовать оптрон HCPL-2531), а проблемы помех по общему проводу при этом эффективно снимаются.

ИМС IR2233 и IR2235 базируются на хорошо зарекомендовавших себя функциональных, схемотехнических и конструктивных решениях трехфазных драйверов, предназначенных для работы с 600-В транзисторами (серия IR213х). Все эти ИМС имеют встроенные схемы защиты от одновременного включения верхнего и нижнего ключей в стойках, от недостаточной величины напряжения питания выходных каскадов, от превышения порогового значения тока через шунт, включенный в минусовую шину питания. Кроме того, в них интегрированы фильтры по входам управления в сочетании с триггерами Шмитта. Задержки распространения сигналов в разных трактах ИМС невелики и хорошо согласованы между собой, а действие защит распространяется одновременно на все три фазы. В большинство ИМС интегрирован также линейный усилитель сигнала с токового шунта. Между собой IR2233 и IR2235 отличаются только пороговыми значениями срабатывания и отключения защиты при слишком низком напряжении питания ИМС: у IR2233 они составляют 8,2 и 8,6 В соответственно, а у IR2235 — 9,4 и 10,4 В. Таким образом, IR2235 предпочтительнее для применения вместе с IGBT, требующими более высоких напряжений на затворе для быстрого и надежного включения. В ИМС IR2235 встроена функция программной блокировки работы инвертора сигналом от управляющего микроконтроллера (а не только аппаратная блокировка по условиям недостаточности напряжения питания ИМС или превышения тока в силовой цепи пороговой величины). Сброс блокировки в IR2235 осуществляется специальным логическим сигналом. Также следует отметить, что в IR2235 до минимума сокращено аппаратно реализованное «мертвое время» между переключениями IGBT в стойке, составляющее 250 ± 150 нс.

ИМС трехфазного драйвера IR2238 серьезно отличается от рассмотренных выше приборов. Наиболее значимым отличием от других трехфазных драйверов является наличие функции контроля падения напряжения на управляемых IGBT, которая позволяет детектировать выход IGBT из состояния насыщения и выявлять токовые перегрузки в силовых цепях. Эта функция более характерна для драйверов высокого уровня, применяемых в системах управления мощными силовыми модулями. В ИМС IR2238 в качестве порога защиты используется напряжение в 8 В (на срабатывание защиты) с гистерезисом 1 В. Помимо блокировки работы ИМС при выходе какого-либо IGBT из состояния насыщения, соответствующие логические сигналы также транслируются на управляющий микроконтроллер, т. е. система управления верхнего уровня имеет полную информацию о работе силовой части инвертора и конкретном месте возникновения проблем. Чтобы дать силовому IGBT время для полноценного перехода в проводящее состояние и исключить ложные срабатывания защиты, функция контроля напряжения насыщения автоматически маскируется на 3 мкс. После выявления токовой перегрузки отключение всех выходных силовых ключей происходит через 1 мкс. Другое важное функциональное отличие IR2238 от менее «продвинутых» ИМС драйверов — сложная схема выходного каскада, обеспечивающая не только разные величины сопротивлений в цепи затвора при включении и выключении ключа, но и форсированное «предвключение», а также адаптацию ИМС к текущему режиму работы ключа. В начале процесса включения, пока напряжение на затворе силового транзистора нарастает от нуля до уровня плато Миллера (примерно в течение 200 нс), заряд затвора осуществляется через два вывода соответствующего канала драйвера (два ключа внутри ИМС подключены к плюсу питания) и два параллельных резистора, что дает сравнительно небольшое полное сопротивление в цепи затвора и обеспечивает малую длительность этого этапа. Затем один из внутренних ключей размыкается, и сопротивление в цепи затвора увеличивается. Его величину на втором этапе включения выбирают исходя из желаемой (не слишком большой!) скорости уменьшения напряжения на силовых электродах включающегося IGBT. Соответственно, при отключении транзистора в условиях перегрузки, когда предельно важно обеспечить его «мягкую», безопасную коммутацию, разряд емкости цепи затвора производится не через основной внутренний ключ, рассчитанный на ток около 540 мА, а через специальный высокоомный транзистор с сопротивлением примерно 500 Ом (при этом уже не имеет особого значения величина внешнего резистора в разрядной цепи). Также следует отметить возможность программирования «мертвого вре-

Таблица 2. ИМС трехфазных драйверов от International Rectifier

Наименование	Каналов	I_{O+} , мА	I_{O-} , мА	$DT_{тип.}$, нс	$DT_{макс.}$, нс	$T_{off тип.}$, нс	Инвертированные входы	Корпус
IR2233	6	250	500	250	750	700	LIN/HIN	SOIC-28 PDIP-28 PLCC-44
IR2235								
IR2238Q	7	350	540	1000	550	550	HIN	MQFP-66

мени» (в диапазоне от 100 нс до 5 мкс) одновременно во всех каналах с помощью одного внешнего резистора и наличие дополнительного (седьмого) канала ИМС для управления IGBT, коммутирующим тормозное сопротивление в составе привода или реализующим функции активного повышающего корректора коэффициента мощности.

ИМС измерения тока фазы электродвигателя

Как известно, для получения высоких динамических характеристик ЧРП (обеспечения быстрой и точной отработки заданий по скорости и положению привода и парирования возмущений) очень желательно иметь внутренний, достаточно быстродействующий и в меру точный контур регулирования тока электродвигателя. Хотя большинство ИМС драйверов имеют встроенный усилитель напряжения токового шунта, включенный в отрицательную силовую шину, использование его в качестве датчика тока не позволяет реализовать широкополосный контур тока, а также требует значительных вычислительных ресурсов для получения адекватных, гладких оценок для тока статора (фазных токов). В высококачественных приводах необходимы непосредственные датчики токов в фазах электродвигателя [1, 2]. IR предлагает недорогой, малогабаритный вариант решения этой проблемы с помощью ИМС датчиков фазных токов — IR2277 и IR22771 (рис. 5). Токковые сигналы снимаются с шунтов, включенных непосредственно в фазные провода, усиливаются, конвертируются в ШИМ и транслируются на управляющий микроконтроллер или DSP [23]. Подавление синфазной помехи (влияние напряжения на фазном проводе на величину сигнала фазного тока) составляет 100 дБ (в т. ч. при воздействии импульсной помехи со скоростью изменения напряжения вплоть до 50 В/нс), а усовершенствованный алгоритм работы встроенного в ИМС фильтра уменьшает задержку сигнала с датчика тока. Параметры фильтра (четыре варианта настройки) программируются заданием соответствующих логических

уровней на входах ИМС. На выходах ИМС формируются логический сигнал превышения фазным током пороговых значений (обоих полярностей) и ШИМ-сигнал, пропорциональный величине фазного тока. Для уменьшения собственного потребления «сдвигателя уровня» преобразование аналогового сигнала в ШИМ сделано несимметричным. Коэффициент заполнения изменяется в диапазоне 10–30% со средним значением (при нулевом токе) 20%. В ИМС IR2277 дополнительно встроен канал восстановления аналогового сигнала с хорошим подавлением несущей частоты ШИМ и малым запаздыванием. Его выход подключается к аналоговому контуру регулирования тока электродвигателя или DSP.

Заключение

IR предлагает комплексное конкурентоспособное и экономически эффективное решение для построения систем электропривода с управлением частотой на мощности от единиц до десятков киловатт. Для систем электропривода с питанием от одно- и трехфазной сетей пользователю доступны 1200-В силовые IGBT с функцией защиты от КЗ, а также ИМС полумостовых и трехфазных драйверов, обеспечивающие затворные токи до 3 А и обладающие широким спектром функций защиты выходного каскада. Высокая надежность и отличные электрические и тепловые характеристики этих компонентов позволяют построить систему управления двигателем любого типа для различных бытовых и промышленных применений.

Литература

1. Румянцев М. Высоковольтные ИС для промышленного привода // Новости электроники. 2007. № 7, 10.
2. Solutions for industrial drives. Electronic speed-control systems save energy and increase performance // Technical papers. 04/2013.
3. Variable frequency driver. Energy efficiency. Reference guide // CEATI International. 2009.
4. Neuberger T., Weston St. Variable frequency drives: energy savings for pumping applications.

5. Eaton Corporation. Industry Application IA04008002E. 11/2012.
6. Genaw B., Yan T., Olsson Er., Leland D., Lu B., Ruchti Th. Active energy control — optimum solution for maximum savings. Eaton Corporation. Industry Application IA04008001E. 06/2012.
7. Harmonic reduction methods. Eaton Corporation. Product Application AP04014001E. 04/2012.
8. Adjustable frequency drives and power factor correction capacitors. Eaton Corporation. Application Note AP040002EN. 08/2013.
9. The application of adjustable frequency drives to meet the requirements of IEEE 519-1992. Clean Power Applications. Eaton Corporation. Application Note AP040006EN. 08/2013.
10. Efficient semiconductor solutions for motor control and drives // Technical papers. 02/2012.
11. Петропавловский Ю. Современная элементная база для привода двигателей фирмы International Rectifier // Силовая электроника. 2011. № 4.
12. The reflective wave phenomena. Eaton Corporation. Application Note AP040013EN. 08/2013.
13. Автушенко К., Соломатин М. Модули IRAM — интегрированное решение для управления трехфазными двигателями от компании International Rectifier // Силовая электроника. 2013. № 3.
14. Башкиров В. Интеллектуальные силовые модули компании International Rectifier для электроприводов малой мощности // Силовая электроника. 2005. № 2.
15. Pump and Fan Start-up Supplement. Eaton Corporation. Application Note AP040012EN. 08/2013.
16. Chou W. Ultrafast 1200V IGBTs reduce switching and conduction losses // Power Electronics. 31.08.2011.
17. Попов А., Попов С. Применение IGBT в преобразовательной технике // Новости электроники. 2013. № 5.
18. Wintrich A., Ulrich N., Reimann T., Tursky W. Application manual power semiconductors. Semikron. 2010.
19. Соломатин М. Характеристики IGBT компании International Rectifier // Электронные компоненты. 2013. № 3.
20. HV floating MOS-gate driver ICs. International Rectifier. Application Note AN-978. 03/2007.
21. Six-Output 600V MGDs Simplify 3-Phase Motor Drives. International Rectifier. Application Note AN-985.
22. Chey Ch., Parry J. Managing transients in control IC. Driven power stage. International Rectifier. Design Note DT97-3.
23. Merello A., Rugginenti A. and Grasso M. Using Monolithic High Voltage Gate Drivers. International Rectifier. Design Note DT04-04.
24. Adams J. Using the IR217x Linear Current Sensing ICs. International Rectifier. Application Note AN-1052. 09/2003.

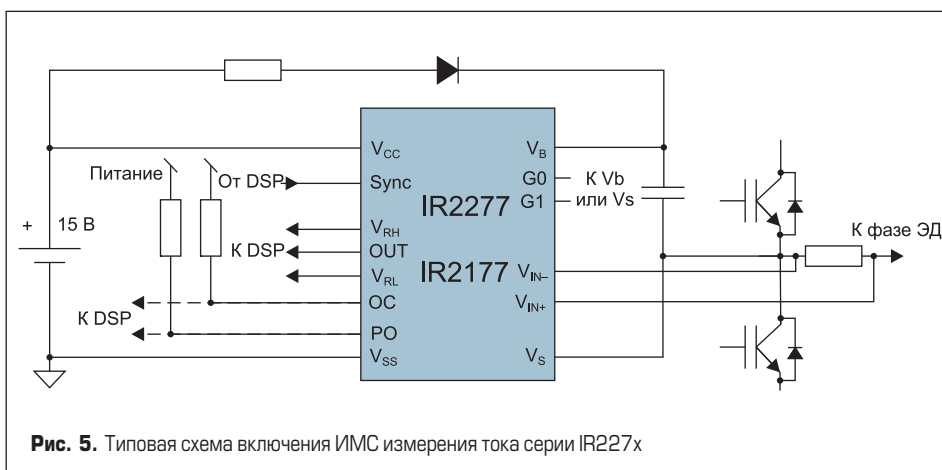


Рис. 5. Типовая схема включения ИМС измерения тока серии IR227x