

Мощные полевые транзисторы в современном электроприводе

Большую часть механической энергии в промышленности, быту и других областях мы получаем путем преобразования электрической энергии с помощью электропривода. От качества электропривода во многом зависят как возможности реализации эффективных технологий, так и затраты энергии в самых разных сферах деятельности.

Аркадий Кроз

philips@aogamma.spb.su

Качественные показатели электропривода, такие как статическая и динамическая точность выполнения заданного движения, коэффициент мощности и коэффициент полезного действия, масса, габариты, надежность, стоимость и т. п., определяются следующими факторами:

- свойства электрической машины — двигателя;
- алгоритм управления;
- свойства управляемого преобразователя энергии.

Преобразователь энергии обеспечивает управление потоком энергии от первичного источника (питающей сети) к двигателю в соответствии с сигналом, формируемым устройством управления. Кроме того, во многих случаях преобразуется форма электрической энергии. Например, переменное напряжение сети трансформируется в постоянное или переменное напряжение другой частоты.

На протяжении длительного времени сложность, стоимость и надежность устройства управления были тесно связаны со сложностью алгоритма управления. Разработчики систем электропривода были вынуждены искать наиболее простые алгоритмы, обеспечивающие выполнение требований, предъявляемых к системе. К середине 70-х годов XX века развитие технологии полупроводниковых приборов привело к появлению микропроцессоров, а затем микро-ЭВМ и микроконтроллеров. Сегодня применение относительно недорогих микроконтроллеров практически разрывает связь между сложностью алгоритма и затратами на устройство управления. Это позволяет разработчику электропривода использовать сложные алгоритмы управления с цифровой обработкой сигналов для повышения его эффективности. Однако возможности реализации алгоритма все-таки ограничиваются наличием средств контроля координат системы и свойствами преобразователя энергии.

Принципиальная возможность построения систем электропривода со сложными алгоритмами оптимального и адаптивного управления предъявляет высокие требования к преобразователям энергии, ибо теперь от их свойств зависит качество системы.

Ряд фирм поставляют как комплектные электроприводы, так и законченные преобразователи энергии. Последние обычно содержат управляющее устройство на основе микро-ЭВМ с «защитой» программой, несколько аналоговых и дискретных

входов-выходов (в том числе релейных), последовательный интерфейс стандарта RS232, RS485, PROFIBAS и т. п. и преобразователь энергии с выходом постоянного (для управления двигателями постоянного тока) или переменного тока (для синхронных и асинхронных двигателей). Адаптация к конкретному двигателю и задаче управления производится путем «параметрирования» — ввода в управляющее устройство некоторого множества параметров через собственную панель управления или от внешнего устройства.

При разработке электропривода для единичных применений выбор комплектного привода или законченного преобразователя позволяет существенно снизить затраты и обеспечить высокую надежность системы. Однако такие устройства относительно дороги вследствие значительной функциональной избыточности и необходимости проведения большого количества тестов для обеспечения надежности.

При создании систем электропривода для серийного производства (даже при относительно небольших объемах) экономически целесообразно создание специализированного преобразователя энергии. Это обусловлено отсутствием избыточности, возможной загрузкой собственных производственных мощностей и рядом других факторов. Кроме того, на систему электропривода нередко накладываются ограничения, связанные с необходимостью встраивания системы в рабочую машину, особенностями первичного источника энергии, требованиями по электромагнитной совместимости и т. п. В этом случае применение серийного преобразователя или комплектного привода оказывается невозможным (или невыгодным) и появляется необходимость разрабатывать систему электропривода.

Требования к алгоритму управления электроприводом весьма разнообразны. Достаточно распространенны приложения с простейшим дискретным алгоритмом — «включить/выключить». При этом нередко используются относительно простые контактные устройства с ручным или электромагнитным управлением. Однако и в этом случае разработчик системы должен учитывать свойства электрической машины. При прямом пуске двигателя потребляемый ток значительно превышает номинальный и постепенно уменьшается по мере разгона. Отношение пускового тока к номинальному зависит от типа и параметров

двигателя и может составлять от нескольких единиц до нескольких десятков ампер. Значительный всплеск тока и момента на валу приводит к снижению надежности и ресурса системы. Если мощность двигателя соизмерима с мощностью первичного источника энергии (это нередко встречается на подвижных объектах), прямой пуск двигателя вызывает «просадку» напряжения сети, а это отрицательно сказывается на функционировании других потребителей энергии. Поэтому даже при простейшем управлении двигателем использование преобразователя энергии, несмотря на некоторое усложнение, увеличивает надежность и ресурс работы не только электропривода, но и всего комплекса.

Силовые ключи преобразователей энергии

Одним из важнейших вопросов, которые должен решить разработчик, является выбор элементной базы преобразователя энергии. Преобразователи энергии для электропривода строятся на основе импульсного принципа управления потоком энергии. Режим переключения силовых приборов обеспечивает относительно малые потери энергии и, следовательно, возможность снижения массы, габаритов и стоимости самого преобразователя. Однако при этом его выходное напряжение содержит переменную составляющую, частотный спектр которой определяется частотой и последовательностью переключения силовых приборов. Это создает переменную составляющую тока и, как следствие, дополнительные потери энергии в двигателе. Кроме того, если амплитуда переменной составляющей тока превышает его среднее значение, то из-за односторонней проводимости силовых ключей ток нагрузки становится прерывистым, а выходные характеристики преобразователя — нелинейными. Эти недостатки импульсного преобразователя уменьшаются с ростом частоты переключения. Но ее увеличение приводит к росту интенсивности электромагнитных помех, создаваемых преобразователем, и динамических потерь энергии в силовых ключах. В конечном итоге выбор частоты переключения есть результат компромисса между дополнительными потерями в двигателе, силовых ключах и интенсивностью помех. Важно, чтобы элементная база по своим динамическим свойствам позволяла найти этот компромисс при достаточно высокой частоте, когда дополнительные потери в двигателе достаточно малы.

В итоге для силовых ключей импульсных преобразователей энергии наиболее важными становятся такие свойства, как малое сопротивление во включенном состоянии, большое сопротивление в выключенном состоянии и малое время переключения.

Развитие полупроводниковых преобразователей энергии началось с биполярной технологии — производства мощных транзисторов и одно-операционных тиристоров. Совершенствование технологии примерно за последние 40 лет значительно улучшило свойства этих приборов, но не позволило преодолеть трудности, определяемые несколькими фундамен-

тальными факторами. Накопление и рассасывание избыточного заряда неосновных носителей в режиме насыщения ограничивает быстродействие. Отрицательный температурный коэффициент сопротивления в открытом состоянии и положительный температурный коэффициент времени жизни неосновных носителей заряда усиливают неравномерность распределения тока по сечению кристалла и между параллельно соединенными кристаллами. В результате увеличение допустимого тока путем параллельного соединения нескольких приборов приводит к значительным дополнительным затратам. Эти же факторы заставляют ограничивать скорость нарастания тока и ограничивают величину допустимого импульсного тока транзисторов не нагревом, а опасностью вторичного пробоя.

Мощные полевые транзисторы

Совершенствование технологии управляемого легирования и методов обработки поверхности кристалла в конечном итоге позволили создать новый вид приборов — полевые транзисторы с вертикальным каналом (VD MOS, MOSFET, FREDFET). Типичная структура кристалла такого транзистора с каналом N-типа показана на рис. 1.

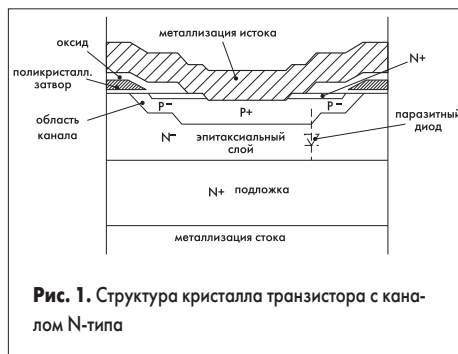


Рис. 1. Структура кристалла транзистора с каналом N-типа

Протекание прямого тока через такую структуру обусловлено только основными носителями заряда (поэтому для них известно и другое название — «униполярные»), что устраняет явление насыщения и связанную с ним инерционность. Короткий проводящий канал большого сечения позволяет получать весьма малое сопротивление в открытом состоянии, а сопротивление выключенного прибора определяется обратным смещенным р-п-переходом. Вследствие высокой степени легирования кристалла температурный коэффициент сопротивления проводящего канала положителен. Это обеспечивает определенное самовыравнивание тока при параллельном соединении транзисторов. В результате по совокуп-

ности свойств, важных для преобразователя энергии, такие приборы значительно превосходят биполярные. Современные преобразователи энергии на полевых и близких к ним по свойствам IGBT-транзисторах обеспечивают при частоте переключения до 20 кГц (а при низких напряжениях — и более) управление мощностью до сотен киловатт при коэффициенте полезного действия 0,95...0,98.

Основной недостаток полевых транзисторов — более высокая удельная (на единицу коммутируемой мощности) стоимость. Однако на протяжении последних 10 лет наблюдается неуклонное сближение цен мощных биполярных и полевых транзисторов. Эта тенденция, очевидно, сохранится и в ближайшие годы из-за постоянного роста объема продаж полевых транзисторов, вытесняющих биполярные из многих областей применения.

Полевые транзисторы с вертикальным каналом выпускаются несколькими фирмами. Одна из них — компания Philips Semiconductors. Отделение полупроводников этой компании выпускает более 300 типов таких транзисторов для различных сфер применения. Среди них n- и p-канальные, рассчитанные на напряжения 30...1000 В, и токи (в длительном режиме) от десятых долей до десятков ампер; транзисторы со встроенной защитой от перегрева и короткого замыкания (интеллектуальные ключи), сборки из двух транзисторов с каналами одного или разных типов, модули трехфазных мостовых схем, в том числе со встроенными блокирующими диодами Шоттки, в корпусах для объемного и поверхностного монтажа (для SMD-технологии). Основные параметры некоторых типов приборов при нормальной температуре приведены в таблицах ниже.

Система параметров мощных полевых транзисторов

Изготовитель дает весьма подробные сведения о свойствах приборов (табл. 1–5). Например:

PSMN004-55W — n-канальный TrenchMOS-транзистор.

Общие сведения:

- напряжение сток-исток $V_{dss} = 55$ В;
- очень малое сопротивление в открытом состоянии;
- быстро переключаемый ток стока $I_d = 100$ А;
- низкое тепловое сопротивление;
- совместимость с логическим уровнем;
- тип корпуса SOT429 (TO247);
- области применения — конверторы постоянного тока, импульсные регуляторы, инверторы.

Таблица 1. Предельные значения параметров мощных полевых транзисторов

Обозначение	Параметр	Режим измерения	Мин.	Макс.	Ед. изм.
V_{DSS}	Напряжение сток-исток	$T_j = (25...175) ^\circ C$	—	55	В
V_{DGR}	Напряжение сток-затвор	$T_j = (25...175) ^\circ C, R_{GS} = 20$ к	—	55	В
V_{GS}	Постоянное напряжение затвор-исток		—	± 15	В
V_{GSM}	Импульсное напряжение затвор-исток	$T_j \leq 150 ^\circ C$	—	± 20	В
I_C	Постоянный ток стока	$T_{mb} = 25 ^\circ C, V_{GS} = 5$ В	—	100	А
I_{CM}	Импульсный ток стока	$T_{mb} = 25 ^\circ C$	—	300	А
P_D	Мощность рассеивания	$T_{mb} = 25 ^\circ C$	—	300	Вт
T_j, T_{dig}	Температура перехода и хранения		-55	175	$^\circ C$

Таблица 2. Предельно допустимая энергия лавинного пробоя

Обозначение	Параметр	Режим измерения	Мин.	Макс.	Ед. изм.
E_{AS}	Неповторяющаяся энергия лавинного пробоя	Отключение индуктивной нагрузки, $I_{AS} = 100A$, начальная температура $25^\circ C$, $t_p = 100 \mu s$, $V_{DD} \leq 25 V$, $R_{GS} = 50 \Omega$, $V_{GS} = 5 V$	—	367	мДж
I_{AS}	Неповторяющийся ток лавинного пробоя		—	100	А

Таблица 3. Тепловое сопротивление

Обозначение	Параметр	Режим измерения	Мин.	Тип.	Макс.	Ед. изм.
Rth j-mb	Тепловое сопротивление переход-корпус		—	—	0,5	К/Вт
Rth j-a	Тепловое сопротивление переход-среда	Спокойный воздух	—	45	—	К/Вт

Таблица 4. Электрические характеристики ($T_j = 25^\circ C$, если не оговорено иное)

Обозначение	Параметр	Режим измерения	Мин.	Тип.	Макс.	Ед. изм.
$V_{(BR)DSS}$	Напряжение пробоя сток-исток	$V_{GS} = 0$; $I_D = 0,25 \text{ mA}$ $T_j = -55^\circ C$	55	—	—	В
$V_{GS(TO)}$	Пороговое напряжение затвора	$V_{DS} = V_{GS}$; $I_D = 1 \text{ mA}$ $T_j = 175^\circ C$	1	1,5	2	В
		$T_j = -55^\circ C$	—	—	2,3	
$R_{DS(ON)}$	Сопротивление открытого канала	$V_{GS} = 10 \text{ V}$; $I_D = 25 \text{ A}$ $V_{GS} = 5 \text{ V}$; $I_D = 25 \text{ A}$	—	3,2	4,2	МОм
		$V_{GS} = 4,5 \text{ V}$; $I_D = 25 \text{ A}$	—	3,6	4,5	
		$V_{GS} = 5 \text{ V}$; $I_D = 25 \text{ A}$	—	3,8	5	
		$T_j = 175^\circ C$	—	6,2	9,5	
I_{GSS}	Ток утечки затвор-исток	$V_{GS} = \pm 10 \text{ V}$; $V_{DS} = 0$	—	0,02	100	нА
I_{DSS}	Начальный ток стока	$V_{DS} = 55 \text{ V}$; $V_{GS} = 0$ $T_j = 175^\circ C$	—	0,05	10	мА
$Qg(\text{tot})$	Общий заряд затвора	$I_D = 100 \text{ A}$; $V_{DD} = 44 \text{ V}$; $V_{GS} = 5 \text{ V}$	—	226	—	нКул
Qgs	Заряд затвор-исток		—	36	—	
Qgd	Заряд затвор-сток		—	106	—	
t_d	Задержка включения	$V_{DD} = 30 \text{ V}$; $R_D = 1,2 \Omega$	—	26	—	нс
t_r			Время нарастания при включении	—	118	
t_d	Задержка выключения при активной нагрузке	$V_{GS} = 10 \text{ V}$; $R_G = 5,6 \Omega$	—	848	—	нс
t_f	Время спада при выключении		—	336	—	
L_d	Внутренняя индуктивность стока	Измеряется от вывода до центра кристалла	—	4,5	—	нГн
L_s	Внутренняя индуктивность истока		—	7,5	—	
C_{iss}	Входная емкость	$V_{GS} = 0 \text{ V}$; $V_{DS} = 25 \text{ V}$; $f = 1 \text{ МГц}$	—	13	—	нФ
C_{oss}	Выходная емкость		—	1,9	—	
C_{rss}	Проходная емкость		—	1,25	—	

Таблица 5. Предельные значения и характеристики обратного диода

Обозначение	Параметр	Режим измерения	Мин.	Тип.	Макс.	Ед. изм.
I_S	Постоянный ток истока	—	—	—	100	А
I_{SM}	Импульсный ток истока		—	—	300	
V_{SD}	Прямое напряжение диода	$I_F = 25 \text{ A}$; $V_{GS} = 0$	—	0,78	1,2	В
		$I_F = 75 \text{ A}$; $V_{GS} = 0$	—	0,92	—	
t_{rr}	Время обратного восстановления	$I_F = 20 \text{ A}$; $-dI_F/dt = 100 \text{ A/мкс}$	—	150	—	нс
Q_{rr}	Заряд обратного восстановления	$V_{GS} = -10 \text{ V}$; $V_R = 20 \text{ V}$	—	700	—	нКул

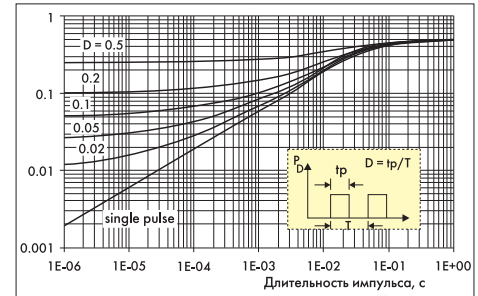


Рис. 2. Переходное тепловое сопротивление, К/Вт

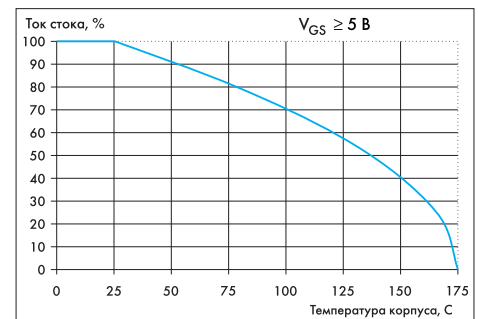


Рис. 3. Зависимость тока стока от температуры корпуса

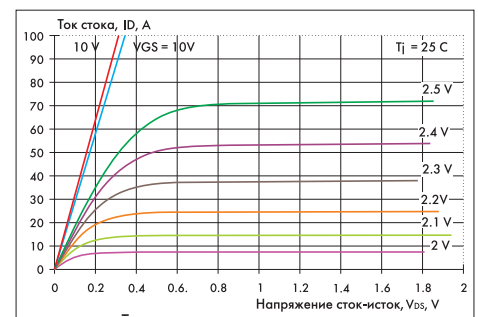


Рис. 4. Типовые выходные характеристики

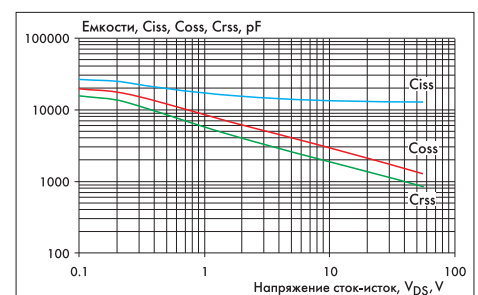


Рис. 5. Типовая зависимость емкости от Усток-исток

Рисунки 2–5 отражают лишь часть сведений, предоставляемых изготовителем. Все параметры и характеристики дают разработчику возможность проектирования и расчета электрических и тепловых режимов с необходимой для практических решений степенью детализации и точности. Этих данных вполне достаточно и для построения собственных макромодели для компьютерного моделирования в системах PSPICE, MicroCAP и т. п.

Продолжение следует.