

УДК 621.382.2

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**Гановский А.Е., магистрант**

*(Ухтинский государственный технический университет,  
г. Ухта, Республика Коми, Россия)*

Одной из важнейших составных частей любой современной системы регулируемого электропривода (РЭП) является силовой преобразователь (СП), проектирование и реализация которого требует простых в управлении силовых полупроводниковых приборов (СПП), имеющих минимальные массогабаритные показатели при максимальных обрабатываемых мощностях, высокое быстродействие, высокую надежность и стойкость к электрическим воздействиям, возникающим при аварийных режимах работы (короткое замыкание (КЗ), перегрузки по току и напряжению), минимальные полные потери мощности и низкую стоимость.

Большинство современных СП для промышленных систем регулируемого электропривода малой и средней мощности, которые в совокупности составляют до 90 % всех промышленных систем РЭП, построено на базе четырех наиболее распространенных типов СПП: тиристоров, мощных биполярных транзисторов (Bipolar Power Transistor (BPT)), полевых транзисторов с изолированным затвором на основе управляющей структуры металл-оксид-полупроводник (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET)), биполярных транзисторов с изолированным затвором (Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)).

Тиристор представляет собой четырехслойный прибор, включающийся подачей импульса на управляющий электрод при положительном падении напряжения между анодом и катодом. Самым существенным недостатком обыкновенного тиристора является то, что он является частично управляемым прибором, поскольку его выключение производится при снижении протекающего через СПП прямого тока до нуля, для чего необходимо применять различные схемы индуктивно-емкостных контуров коммутации, значительно увеличивающие стоимость и потери,

снижающие надежность и ухудшающие массогабаритные показатели всего СП.

Запираемые или полностью управляемые тиристоры (Gate Turn Off (GTO)) изначально лишены этого недостатка, поскольку в них предусмотрена возможность выключения прибора при помощи управляющего электрода. Однако тиристоры GTO чувствительны к скорости нарастания прямого тока  $di/dt$  при включении и скорости нарастания прямого напряжения  $du/dt$  при выключении для ограничения, которых приходится применять специальные схемы формирования траектории включения/выключения (снабберные цепи). Наличие снабберных цепей в системах с СП на GTO ведет к возникновению существенных потерь в преобразователе, часто сводящих на нет все преимущества данного типа СПП. Повышение частоты увеличивает потери, поэтому на практике GTO коммутируются с частотами, не превышающими 250-300 Гц.

Основной особенностью нового типа тиристоров GCT (Gate Commutated Thyristor), по сравнению с приборами GTO, является быстрое выключение, которое реализуется превращением тиристорной структуры в транзисторную при запираии прибора, что делает прибор нечувствительным к эффекту  $du/dt$ . Изменения в конструкции GCT вызваны тем, что динамические процессы, протекающие в приборе при выключении, протекают на один – два порядка быстрее, чем в GTO. Например, минимальное время выключения и блокирующего состояния для GTO и GCT составляет 100 мкс и 10 мкс, а скорость нарастания управляющего тока 3000 А/мкс и 40 А/мкс соответственно [1].

К новым типам тиристоров можно отнести статический индукционный тиристор, называемый так же тиристором с электростатическим управлением. По сравнению с запираемыми тиристорами индукционные имеют ряд преимуществ: более высокие предельные параметры по току и напряжению, меньшее падение напряжение на открытом ключе, большую перегрузочную способность по току, повышенную помехоустойчивость.

Современные тиристоры работают в широком диапазоне напряжений (до 6 кВ) и токов (до 6 кА) [1]. Существует техническая возможность последовательного и параллельного соединения СПП позволяющая наращивать уровень мощности до нескольких сотен мегавольт-ампер. Приборы новых типов спо

собны работать с частотами переключения от 500 Гц до 2 кГц и сочетают в себе оптимальную комбинацию присущих им малых потерь и бесшумной, высокоэффективной технологии выключения путём воздействия на управляющий электрод.

Необходимость создания более быстродействующих управляемых СП привела к появлению целой серии мощных высоковольтных биполярных транзисторов, предназначенных для работы в ключевых режимах и перекрывающих диапазон по напряжению от 100 до 1500 В, при уровне коммутируемого тока в 80 А и рабочих частотах до нескольких десятков килогерц [1]. Однако в современных системах РЭП ВРТ, в силу ряда своих недостатков, практически полностью уступили место более совершенным приборам MOSFET и IGBT.

MOSFET – приборы управляемые напряжением, что дает им значительное преимущество перед ВРТ, управляемым током, по таким показателям как меньшая мощность потребления по управлению и более высокое быстродействие, что позволяет этим СПП устойчиво работать на частотах до нескольких сотен килогерц.

Высоковольтные MOSFET превосходят ВРТ по динамике переключений и имеют меньшие коммутационные потери, но уступают им по квазистатическим показателям, характеризующим величину сопротивления в состоянии проводимости. В результате их потери мощности в состоянии проводимости значительно выше потерь ВРТ. Кроме того, для построения MOSFET эквивалентного ВРТ по току требуется значительно большие по размеру чипы кристаллов, что делает MOSFET в 2-3 раза дороже их ВРТ аналогов.

IGBT удачно объединяет в себе достоинства MOFSET (управление напряжением, оптимальный диапазон мощностей для надежной работы, стойкость к КЗ, малое время переключения при отсутствии времени накопления заряда) и ВРТ (малое падение напряжения в состоянии проводимости). Поскольку в формировании выходного тока у IGBT, как и у любого биполярного транзистора, участвуют два типа носителей зарядов, достигаемая плотность рабочего тока у IGBT в 5-10 раз выше, чем у высоковольтных MOSFET. Следовательно, для реализации того же уровня выходного тока необходимы меньшие по размеру кристаллы. Это выражается в меньшей стоимости СПП и меньшей

входной емкости, что требует и меньших импульсных токов раскочки от драйверов.

По быстродействию IGBT уступают MOSFET, но значительно превосходят BPT. Этот недостаток IGBT, являющийся следствием временной задержки в форме выходного тока (так называемого «хвоста» тока коллектора), присущ (в той или иной мере) всем транзисторным комбинациям, собранным по различным вариантам схемы Дарлингтона. Он обусловлен тем, что выключение выходного транзистора в таких схемах происходит после быстрого выключения входного транзистора и ведется фактически в режиме с оборванной базой. Область безопасной работы IGBT позволяет обеспечить надёжную работу прибора без применения дополнительных снабберных цепей при частотах переключения от 10 до 50 кГц для модулей с номинальными токами в несколько сотен ампер.

Низковольтные MOSFET (до 200 В) могут считаться наиболее совершенными ключевыми элементами из всех типов современных СПП. Этот подкласс MOSFET обладает не только минимальными динамическими потерями и незначительным потреблением мощности по цепям управления, но и очень низкими статическими потерями, а также высокой перегрузочной способностью по току и напряжению.

В высоковольтных системах автоматизированного электропривода MOSFET практически не используются из-за большого уровня статических потерь и высокой цены приборов.

Основной «нишей» применения IGBT на сегодня является электропривод промышленного назначения с диапазоном мощностей от 1 кВт до 350 кВт.

Используемые в выходных каскадах электрических преобразователей электропривода IGBT, как правило, представлены в виде специализированных модулей. Часто в корпусе модуля присутствуют не только чипы выходных транзисторов и обратно-параллельных диодов, необходимых при использовании схем мостового типа, но также и чипы управляющих микросхем и схем защиты IGBT от опасных режимов. В зависимости от величины входного сетевого напряжения электропривода и типа управляемого двигателя требуются различные сочетания пиковых значений напряжения и тока для используемых ключевых элементов. Производятся различные семейства модулей, пе

рекрывающих диапазон по пиковому напряжению от 0,4 кВ до 6 кВ и пиковому току от 50 А до 3400 А [2]. Поскольку необходимая рабочая частота в подобных преобразователях, как правило, не превышает 10 кГц (редко до 20-30 кГц), то достигаемый уровень остаточного напряжения в открытом состоянии IGBT данного применения получается небольшим (1,5-2,5 В), что способствует и достаточно небольшим статическим потерям, которые в указанной области частот фактически определяют общий уровень потерь мощности.

Определенную конкуренцию IGBT-модулям в промышленном электроприводе в нижней части указанного диапазона мощностей оказывают ВРТ-модули, реализуемые на основе составных транзисторов по двух- или трехкаскадной схеме Дарлингтона.

В верхней части указанного диапазона мощностей конкурентами IGBT-модулей в автоматизированном промышленном электроприводе выступают тиристоры новых типов. Тем не менее, именно IGBT наиболее перспективный СПП для применения в промышленном электроприводе, так как он гораздо лучше, чем конкурирующие приборы, стыкуется с логическими цепями управления и защиты, что позволяет создавать высокоэффективные и надежные коммутационные устройства, так называемые «интеллектуальные» модули, которые займут в ближайшее время доминирующие позиции в высоковольтных промышленных системах РЭП малой и средней мощности.

#### Перечень ссылок

1. Электротехнический справочник: В 4-х т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. И.Н. Орлов) – 8-е изд. испр. и доп.– М.: Издательство МЭИ, 2001.– 518 с.

2. Лоренц Л. Состояние и направления дальнейшего развития в сфере разработки, производства и применения силовых полупроводниковых приборов / Электротехника.– 2002.– № 3.