

Снижение энергии потерь в ключевых элементах преобразователей

Игорь Воронин, Павел Воронин (Москва)

В статье рассматривается практический опыт инновационных предприятий России по исследованию и снижению энергии потерь в силовых полупроводниковых ключах автономных инверторов напряжения.

Снижение мощности тепловых потерь в полупроводниковых ключах является актуальной задачей, поскольку данные потери определяют такие важные параметры схемы, как:

- коэффициент полезного действия;
- температуру перегрева транзисторов, от которой зависит надёжность работы всего устройства;
- массогабаритные показатели и распределение объёма элементов преобразователя, в котором, как правило, максимальную величину составляет теплоотвод;
- частоту коммутации транзисторов. Мощность потерь в силовых ключах преобразователя подразделяют на следующие составляющие:
- динамические или коммутационные потери;
- статические потери или потери проводимости;
- потери за счёт тока утечки при открытом ключе;
- потери на управление.

Две последние составляющие относительно малы ввиду небольших значе-

ний токов утечки и управления в современных силовых транзисторах, управляемых по изолированному затвору.

С ростом частоты переключения коммутационные потери, постоянные для каждого из циклов переключения, линейно возрастают. В то же время потери проводимости остаются постоянными и зависят от тока нагрузки и падения напряжения на ключе в течение интервала проводимости.

Проблемы снижения потерь в силовых транзисторах были исследованы при разработке трёхфазного инвертора напряжения, питающего электродвигатель мощностью 30 кВт (см. рис. 1). Напряжение в звене постоянного тока инвертора составляет 640 В, синусоидальный ток нагрузки имеет амплитуду 100 А. Коэффициент мощности нагрузки 0,85, коэффициент модуляции 0,8. Силовые ключи инвертора – стандартные IGBT, изготовленные по эпитаксиальной технологии. Максимальное напряжение ключа составляет 1200 В, средний ток – 100 А.

Для управления инвертором на первом этапе применялась широтно-импульсная модуляция (ШИМ) по синусоидальному закону. Измеренная энергия динамических потерь для отдельного транзистора со встречно-параллельным диодом при жёсткой коммутации и максимальном токе нагрузки оказалась равной 14,3 мДж. Тогда при частоте переключения 20 кГц мощность коммутационных потерь составляет 91,2 Вт на один ключ.

Данные транзисторы в области насыщения и их обратные диоды на прямом участке ВАХ имеют напряжение отсечки 1,8 В и дифференциальное сопротивление 14 мОм соответственно. При этом мощность статических потерь равна 92,3 Вт на один ключ. Таким образом, суммарные потери в мостовой схеме трёхфазного инвертора напряжения составляют 1100 Вт. Соответственно,

КПД схемы при мощности нагрузки 30 кВт оказывается равным 96,5%.

СНИЖЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Для снижения потерь проводимости необходимо уменьшать напряжение насыщения транзистора. Напряжение насыщения IGBT определяется распределением носителей заряда в его высокоомной базе. Чем больше средняя плотность носителей, тем меньше падение напряжения на открытом ключе. Стандартные серии IGBT с планарной конструкцией затвора имеют относительно высокое значение остаточного напряжения. В рассматриваемом примере оно составляет 3,2 В при максимальном токе нагрузки. Основной причиной повышенного напряжения является конструкция данного типа транзисторов, где коллектор прибора закорочен общим металлическим электродом на исток управляющей структуры IGBT. При этом коллектор прибора интенсивно выводит носители заряда из прикатодной области базы транзистора, повышая тем самым его напряжение насыщения.

Принципиальным решением данной проблемы является создание барьерного слоя между базой транзистора и его коллектором, который препятствовал бы утечке носителей заряда в катодный электрод транзистора.

В 2003–2006 гг. в России ОАО НПО «Энергомодуль», ОАО «Ангстрем» и ФГУП ВЭИ в рамках реализации Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» были разработаны основы технологии гибридного IGBT – полупроводникового прибора на двух кристаллах, реализующего идею барьерного слоя. Была изготовлена экспериментальная серия приборов с электрическими параметрами 1200 В и 50 А. Напряжение насыщения гибридного IGBT в зависимости от степени облучения составляло от 1,5 до 2,0 В. (см. рис. 2).

Тогда же компания Mitsubishi Electric выпустила на рынок монолитный IGBT с мезапланарной конструкцией затвора, в котором также реализована идея



Рис. 1. Внешний вид трёхфазного инвертора напряжения мощностью 30 кВт

барьерного слоя. Данные транзисторы получили название CSTBT (Carrier Storage Trench Bipolar Transistor), т.е. транзисторы с накоплением носителей заряда. Напряжение насыщения CSTBT составило не более 2,0 В.

Гибридные и монокристалльные IGBT с мезопланарной конструкцией затвора и барьерным слоем не имеют качественных и количественных различий. Можно полагать, что использование оптимизированных конструкций обоих приборов приведёт к тому, что их основные характеристики будут практически идентичны. При этом снижение мощности проводимости составляет порядка 40%.

СНИЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Динамические потери в силовом транзисторе принято выражать через энергию потерь за один цикл коммутации. Тогда средняя мощность динамических потерь будет прямо пропорциональна произведению данной энергии и частоты коммутации.

Динамические потери, таким образом, могут быть снижены следующими способами:

1. снижением частоты коммутации. Однако данный способ не может быть признан рациональным, поскольку ведёт к увеличению габаритов электронных компонентов схемы;
2. снижением времени коммутации за счёт увеличения скорости переключения транзисторов по току. Данный способ имеет предельные ограничения, связанные с наличием паразитных индуктивностей монтажа, что может приводить к высоким коммутационным перенапряжениям;
3. снижением амплитуды тока или напряжения при коммутации;
4. снижением количества коммутаций на периоде выходного напряжения инвертора;
5. изменением траектории переключения транзисторов на интервалах коммутации.

Способ 4 может быть реализован при векторном принципе управления инвертором напряжения, когда переключения в схеме осуществляются между несколькими, заранее выбранными состояниями схемы инвертора. При этом дважды за период выходной частоты каждая фаза инвертора становится пассивной, т.е. коммутация силовых ключей в ней не происходит. Таким образом, количество переключе-

ний силовых транзисторов уменьшается ровно на треть, а уровень снижения амплитуды коммутируемого тока определяется применяемым алгоритмом векторного управления.

В рассматриваемом инверторе напряжения были применены два алгоритма векторного управления:

- симплексная ШИМ, когда пассивное состояние соответствующей фазы инвертора реализуется при максимальном фазном напряжении;
- векторная ШИМ (The Highest Current Not Switched Sequence), когда пассивное состояние соответствующей фазы инвертора реализуется при максимальном токе фазы.

При заданном коэффициенте мощности нагрузки применение симплексной ШИМ уменьшает амплитуду коммутируемого тока незначительно – всего лишь до 99 А. Второй из рассматриваемых алгоритмов приводит к снижению амплитуды до 86,6 А. Соответственно, снижение мощности динамических потерь в первом случае происходит в полтора раза (до 61,1 Вт), а во втором случае – в два раза (до 45,6 Вт на один ключ).

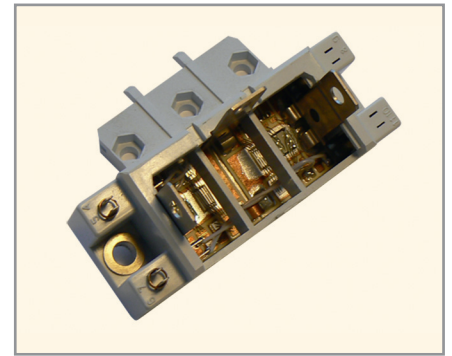
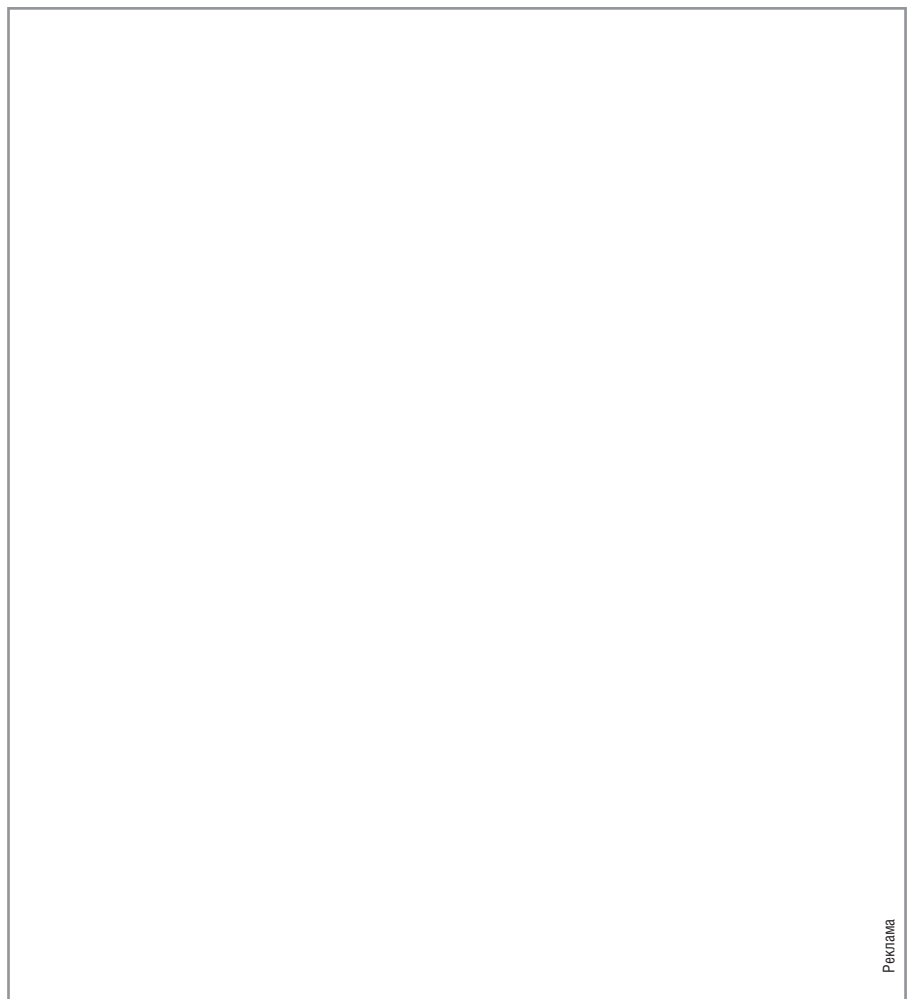


Рис. 2. Силовой модуль гибридного IGBT полумостовой конфигурации

Отметим также, что переход от классического алгоритма управления по синусоидальному закону к векторному не приводит к существенному изменению статических потерь проводимости в схеме инвертора. Таким образом, векторный принцип управления повышает эффективность преобразования электроэнергии до 97 и 97,3% соответственно.

Снижение напряжения на коммутируемом ключе (способ 3) реализуется при переходе на многоуровневый принцип формирования выходного напряжения инвертора. Возможны



Реклама

следующие варианты построения силовой части многоуровневого инвертора:

- инвертор с фиксированной нулевой точкой;
- инвертор с навесными конденсаторами;
- каскадная схема инвертора.

С энергетической и экономической точек зрения наиболее приемлемым оказывается вариант многоуровневой схемы с фиксированной нулевой точкой. Для снижения динамических потерь была применена трёхуровневая схема с фиксирующими диодами. Экспериментально установлено, что энергия динамических потерь за один цикл коммутации имеет степенную зависимость от напряжения переключения с коэффициентом 1,51. Поскольку напряжение на силовых ключах в трёхуровневой схеме вдвое меньше по сравнению с классической схемой инвертора, мощность динамических потерь удалось снизить до 32 Вт на один ключ. Однако при этом следует учитывать изменение суммарных потерь проводимости в схеме за счёт увеличения вдвое количества основных ключей инвертора и применения фиксирующих диодов (два на каждую фазу).

Были исследованы два варианта. Сначала в трёхуровневой схеме были применены приборы того же класса напряжения, что и в двухуровневом инверторе. При этом оказалось, что суммарные статические потери проводимости увеличились с 554 Вт, полученных для классической схемы, до 1231 Вт. Соответственно, несмотря на значительное снижение динамических потерь, КПД схемы в итоге уменьшился до 95,8%.

Поскольку напряжение на ключевых элементах инвертора в трёхуровневой схеме вдвое меньше, во втором варианте были использованы транзисторы и диоды с максимальным напряжением 600 В. Данные приборы выполняются на подложках со значительно меньшим удельным сопротивлением и, соответственно, имеют меньшие значения напряжений отсечки и дифференциальных сопротивлений на участках проводимости своих ВАХ. При этом суммарная мощность статических потерь в трёхуровневой схеме составила 620 Вт.

Транзисторы с меньшим классом напряжения имеют и более высокое быстродействие. Однако в трёхуровневой схеме инвертора их скорость переключения была выбрана такой, что-

бы энергия динамических потерь оставалась неизменной по сравнению с первым вариантом. При этом итоговый КПД преобразования был равен 97,6%, т.е. выше, чем для двухуровневой схемы инвертора.

Близость к нулю переменной тока или напряжения на интервале коммутации позволяет практически исключить динамические потери. Для этого с помощью дополнительных элементов схемы формируют специальные траектории переключения транзисторов (способ 5): при нулевом напряжении (ПНН) и при нулевом токе (ПНТ).

В инверторах напряжения практическое применение находят варианты мягких коммутаций со следующими признаками:

- 1) включение при нулевом токе и выключение при нулевом напряжении. Данный вариант реализуется, как правило, с помощью пассивных демпферных цепей и имеет относительно низкую эффективность из-за дополнительных энергетических потерь в схеме;
- 2) включение и выключение при нулевом напряжении. В данном варианте с помощью параллельного квазирезонансного контура происходит предварительный разряд выходной ёмкости транзистора перед его включением. Затем конденсатор контура используется для формирования плавно нарастающего напряжения на ключе при его заперении;
- 3) включение и выключение при нулевом токе. В данном варианте с помощью последовательного квазирезонансного контура происходит предварительный сброс тока транзистора перед его выключением. Затем дроссель контура используется для формирования плавно нарастающего тока на отпираемом ключе;
- 4) включение при нулевом напряжении и выключение при нулевом токе. Для уменьшения энергии динамических потерь данное решение является наиболее эффективным и в то же время наиболее трудно реализуемым, поскольку частота квазирезонансного процесса перед включением транзистора должна отличаться от частоты аналогичного процесса при его выключении.

Для рассматриваемой схемы были применены варианты 2 и 4, т.е. мягкая коммутация при нулевом напряжении с применением магнитно-связанного дросселя с дополнительной индуктивностью и мультирезонансная схема

мягкой коммутации, обеспечивающая переключение транзисторов инвертора как при нулевом напряжении, так и при нулевом токе за каждый цикл коммутации.

Исследование каждого из вариантов позволило установить аналитические критерии реализации мягкой коммутации при изменении тока нагрузки. Установлено, что вариант с магнитно-связанным дросселем наиболее эффективен при относительно высоких напряжениях в звене постоянного тока инвертора. В свою очередь, мультирезонансная схема обеспечивает устойчивую мягкую коммутацию при относительно высоких токах нагрузки.

Практическая полезность представленных решений определяется не только возможностью снижения коммутационных потерь в основных транзисторах схемы. Необходимо также, чтобы общий уровень снижения энергии динамических потерь был выше суммарных потерь в дополнительных элементах схемы. Расчёт дополнительных потерь, вносимых в схему вспомогательными элементами, осложняется тем, что данные потери зависят от тока нагрузки инвертора. Поэтому их количественная оценка проводилась методом численного интегрирования отдельных составляющих для каждого такта коммутации.

Для приведённых параметров схемы и при частоте коммутации 20 кГц для варианта мягкой коммутации с магнитно-связанным дросселем КПД инвертора напряжения оказался равным 98%, а для варианта с мультирезонансной схемой – 97,7%.

ЛИТЕРАТУРА

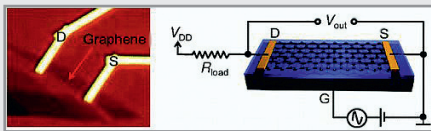
1. Резников А.Е., Воронин П.А., Щеткин Н.П. Гибридный IGBT-статические и динамические характеристики. Силовая электроника. 2006. № 3. С. 28–30.
2. Бономорский О.И., Воронин П.А. Новый класс силовых полупроводниковых модулей – модули H-IGBT. Перспективные технологии электроэнергетики: сборник тезисов. 2007.
3. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи. Семейства, характеристики, применение. Додека-XXI, 2005.
4. Воронин П.А., Воронин И.П. Устройство для снижения динамических потерь в ключевых элементах трехфазного инвертора напряжения. Вестник МЭИ. 2010. № 4.
5. Воронин И.П. Схема мягкой коммутации ключевых элементов трехфазного инвертора напряжения. Вестник МЭИ. 2010. № 5.



Новости мира News of the World Новости мира

Графен меняет принципы построения электронных схем

В 2004 г. был впервые получен уникальный материал графен – кристалл углерода толщиной в один атом, а первооткрыватели (А.К. Гейм и К.С. Новосёлов) получили в этом году Нобелевскую премию. Необычные свойства графена уже нашли своё применение в различных электронных приборах. Группа исследователей из университета Райса (Rice University) совместно с коллегами из Калифорнийского университета (University of California) разработала уже целый усилитель на основе лишь одного графенового транзистора, способный переключаться между тремя режимами при помощи только управляющего напряжения.



Графеновый транзистор в усилителе может практически на лету менять полярность полупроводниковых переходов (n-p-n или p-n-p) в отличие от кремниевых приборов с жёстко заданным видом проводимости. Комбинируя режимы и частоту переключений, можно расширить диапазон функций схемы от тривиального усиления сигнала до фазового сдвига частоты и модуляции. И всё это лишь на одном транзисторе. Показанный прототип усилителя сулит порядковое уменьшение количества элементов на чипе и соответствующее энергопотребление. Иными словами, электронная начинка той же гарнитуры Bluetooth, во-первых, будет значительно проще и меньше по габаритам, а во-вторых, сможет работать без подзарядки гораздо дольше. Универсальность графеновых приборов фактически заставляет пересмотреть все методы построения электронных схем при сохранении технологии кремниевой индустрии.

<http://www.ucr.edu/>

TDK представила оптический диск ёмкостью 1 Тбайт

Раньше в прессе уже проскакивала информация о том, что TDK разрабатывает оптический диск рекордной на сегодняшний день плотности. И вот теперь его можно увидеть воочию. Сегодня компания представила на суд публики готовое творение ёмкостью 1 Тбайт.



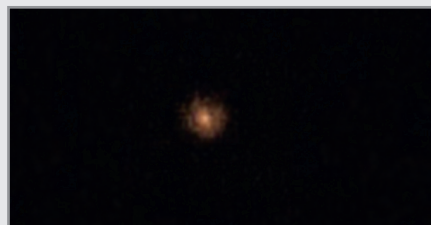
Диск имеет 16 слоёв на обеих сторонах, каждый из которых может вмещать до 32 Гб информации. Это значительно больше, чем плотность записи предыдущих разработок. Толщина рабочего слоя здесь также значительно ниже, чем в дисках Blu-ray, благодаря чему скорость считывания и записи также намного выше. Для этого, тем не менее, используется лазер с такой же длиной волны, как и в приводах Blu-ray.

Как сообщили представители TDK, коммерческая реализация данной технологии зависит от других производителей дисков и электронных устройств. На данный момент уже имеются в продаже диски TDK ёмкостью 320 Гб, представленные компанией год назад.

<http://www.engadget.com/>

Учёные захватили и сфотографировали отдельный атом

Группа учёных из университета Отаго (University of Otago) во главе с Миккелем Андерсоном (Mikkel F. Andersen) разработала технологию изоляции и захвата отдельного атома. Результатом трёхлетнего исследовательского проекта стала возможность манипулирования отдельным атомом Рубидия 85 с помощью оптического пинцета и технологии лазерного охлаждения. Учёные даже сделали снимок отдельного атома с помощью микроскопа.



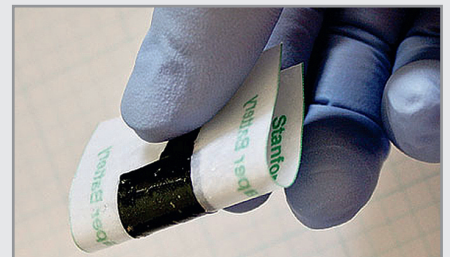
Сложность подобных экспериментов заключается не столько в слишком малых размерах исследуемых объектов (цепочка из 10 млрд. атомов составляет всего 1 м в длину), сколько в нейтральности таких атомов, как рубидий. В отличие от ионов, эти атомы, движущиеся со скоростью звука, невозможно удержать электрическим полем. Практическое применение эта техно-

логия может найти при создании квантового компьютера. Андерсен говорит, что их метод отделения и захвата атомов позволяет собирать целую группу из десяти идентичных атомов. По его мнению, для создания квантового компьютера, способного конкурировать в вычислительной мощности с кремниевыми собратьями, необходим набор как минимум из 30 атомов. Следующим этапом исследователи считают разработку надёжного метода для «запутывания» атомов группы между собой.

<http://www.physorg.com/>

Новые гибкие аккумуляторы сделают мобильную технику тоньше

Современная мобильная техника могла бы быть гораздо компактнее, если бы не пришлось использовать объёмные источники питания. Хорошо, что разработки в области сверхтонких батарей не прекращаются – последними здесь отметились исследователи из университета Стэнфорда (Stanford University), представив компактное интегрированное решение.



В качестве основы для будущей батареи команда специалистов по материалам и электрохимии применила обычную бумагу, с двух сторон покрытую плёнкой с нанесёнными на неё углеродными нанотрубками и металлосодержащим литием. В такой конструкции слои лития исполняют роль электродов, а нанотрубки – токоприёмников. Бумага же выступает в качестве разделителя электродов, а также механической поддержки.

Толщина новых батарей составляет всего 300 мкм, при этом они энергетически более плотные, если сравнивать с другими гибкими решениями. Кроме того, характеристики батарей не ухудшаются после 300 циклов зарядки. Создатели уверены, что полученные практические наработки позволят в ближайшем будущем представить новое поколение гибких и удобных источников питания. Это как раз то, что пришлось бы весьма кстати для мобильных гаджетов современности.

<http://ubergizmo.com/>