

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ В БОРТОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

Смирнов Д.С.¹, Охапкин С.И.¹, Половенко В.Т.²

¹ ГБОУ ВПО "Вятский государственный университет" Министерства образования и науки Российской Федерации, Киров, Россия (610000, г.Киров, ул. Московская, 36)

² ЗАО "Кремний-маркетинг", Брянск, Россия (241037, г. Брянск, ул. Красноармейская, 103)

Рассмотрены пути снижения массы авиационных электроприводов и выявлена зависимость массы от параметров ключей инвертора. Оценены различные конструкции и материалы силовых полупроводниковых ключей и сделан вывод об их применимости в преобразователях электроприводов. Определено, что наилучшими характеристиками обладают приборы типов IGBT и MOSFET. Для определения частотных возможностей ключей был проведен тепловой расчет режимов работ SiIGBT и SiCMOSFET модулей одного класса. Расчет и моделирование производились для диапазона частот несущей ШИМ от 10 до 100 кГц при фиксированной мощности нагрузки. Схема преобразователя – трехфазный мостовой инвертор. Полученные результаты свидетельствуют о преимуществе карбидокремниевого модуля во всем частотном диапазоне. Для выбранных условий работы предельная частота SiIGBT составляет 35 кГц, в то время как SiCMOSFET имеет запас по мощности на 100 кГц.

Ключевые слова: электропривод, полупроводник, частота, потери, широтно-импульсная модуляция (ШИМ).

EFFICIENCY ASSESSMENT OF APPLICATION OF POWER SWITCHES IN ONBOARD ELECTRODRIVES

Smirnov D.S.¹, Okhapkin S.I.¹, Polovenko V.T.²

¹ Vyatka state university, Kirov, Russia (610000, Kirov, Moscow str., 36)

² Kremny-Group, Bryansk, Russia (241037, Bryansk, Krasnoarmeysk str., 103)

Ways of decreasing mass of onboard electrodrives are considered and dependence of weight on parameters of switches of the inverter is revealed. Various designs and materials of power semiconductor switches are estimated and the conclusion on their applicability in converters of electrodrives is perform. It is defined that the best characteristics possess devices of the IGBT and MOSFET types. It's carried out a thermal calculation of modes of work of Si IGBT and SiC MOSFET modules of one class, for definition of frequency opportunities of switches. Calculation and modeling were made for the range of frequencies of PWM carrier from 10 to 100 kHz, on the assumption of fixed loading power. The converter scheme – the three-phase bridge inverter. The received results testify to advantage of the silicon carbide module in all frequency range. For the chosen working conditions limit frequency of Si IGBT makes 35 kHz, while SiC MOSFET have a stock of power on 100 kHz.

Keywords: electrodrive, semiconductor, frequency, losses, pulse-width modulation (PWM).

На сегодняшний день электроприводы получили широкое распространение в бортовых системах летательных аппаратов. Это объясняется их высокими эксплуатационными свойствами: точностью, надежностью, значительным ресурсом и минимальными требованиями к обслуживанию. При этом у бортовых электроприводов есть и недостатки, влияющие на эффективность летательного аппарата в целом. В рамках данной работы рассматриваются пути оптимизация бортовых электроприводов. Наибольшая часть работ по оптимизации электроприводов посвящена задачам увеличения КПД и снижения стоимости общепромышленных систем. В бортовых системах, напротив, допустима большая стоимость компонентов. Высокие требования предъявляются по массогабаритным параметрам и надежности.

Как известно, наибольшее распространение в авиации получили быстроходные синхронные электрические машины с электрической частотой от 400 Гц и выше. Это объясняется прямой зависимостью удельной мощности машины от электрической частоты. Увеличение рабочей частоты неизбежно приводит к снижению индуктивности обмоток машины, что ведет к возникновению проблем, не характерных для общепромышленного привода. Проблемы обусловлены малой постоянной времени RL-цепи обмотки и, соответственно, повышенным уровнем пульсаций тока, который, в частности, ведет к увеличению мощности генерируемых помех. При этом получение объективной информации о токах в линейных проводах затруднено, что снижает эффективность векторного управления. Потери в стали двигателя также зависят от уровня пульсаций магнитного поля [1].

Для общепромышленных двигателей с номинальной частотой 50 Гц считается достаточной частота ШИМ 5..10 кГц. При указанных частотах перечисленные явления снижаются до приемлемого уровня. Исходя из этого, оптимальную частоту ШИМ бортовых 400-Гц двигателей можно оценить в 40..80 кГц. Минимальной частоте диапазона соответствуют минимальные динамические потери в инверторе, а максимальной частоте – минимальные потери в двигателе и минимальные габариты фильтров ЭМС. На сегодняшний день в инверторах бортовых электроприводов используются быстрые кремниевые IGBT модули. Рядом зарубежных компаний предлагаются IGBT ключи класса WARP с декларируемой рабочей частотой до 150 кГц, однако в модульном исполнении они недоступны. Из-за известных ограничений в некоторых разработках требуется использование отечественной элементной базы. Предельная частота коммутации отечественных IGBT модулей ограничена 35 кГц.

При рассмотрении частотных возможностей силовых ключей, следует учитывать условия эксплуатации и требования к надежности. Бортовые электроприводы, особенно в зоне реактивных двигателей, должны работать при температурах до 100 °С и пониженном давлении, что затрудняет отвод тепла. Из соображений надежности также следует обеспечивать запас по мощности силового модуля. Следовательно, доступная для использования мощность силового модуля может быть в несколько раз меньше номинальной. По этой причине частота ШИМ в бортовых электроприводах с IGBT модулями фактически ограничена 20 кГц.

На частоте 20 кГц остаются актуальными все перечисленные проблемы, связанные с пульсациями тока в двигателе. Для их решения требуется установка массивных фильтров силовой цепи и экранов [2], а также завышение мощности двигателя. Все эти меры приводят к увеличению общей массы системы.

Можно выделить несколько направлений оптимизации электроприводов:

- снижение потерь в стали двигателя;
- увеличение электрической частоты двигателя;
- снижение массы фильтрующих элементов;
- снижение общих потерь в силовых ключах с уменьшением размера охладителя;
- снижение массы экрана жгута «инвертор-двигатель» или установка инвертора непосредственно на двигатель;
- увеличение допустимой температуры охладителя.

Для реализации этих подходов необходимо использование в инверторе более быстрых и высокотемпературных силовых ключей [4]. Одним из перспективных путей является использование силовой части на основе широкозонных полупроводников: карбида кремния и арсенида галлия [3].

Проведем оценку серийно выпускаемых типов силовых ключей и их материалов. Ориентировочные требования к ключам бортового инвертора: выдерживаемое напряжение – не менее 600 В, пропускаемый в статическом режиме ток – не менее 50 А, допустимая частота переключений – не ниже 50 кГц. Тиристорные ключи, как правило, предназначены для работы в высоковольтных низкочастотных схемах мощностью от 30 кВт. Предельная частота этого класса приборов – 10 кГц. Транзисторные ключи представлены тремя группами приборов: биполярными, полевыми и комбинированными. Биполярные ключи непригодны для построения инвертора из-за значительной мощности управления и предельной частоты работы силовых приборов на уровне 50 кГц. Таким образом, в качестве ключей бортового инвертора следует рассматривать лишь две группы приборов: полевые и комбинированные транзисторы. Самыми быстрыми из комбинированных ключей являются IGBT. К полевым транзисторам относятся приборы с изолированным затвором (MOSFET) и приборы с управляющим р-п переходом (JFET). Потенциально JFET транзисторы обладают большим быстродействием и меньшими потерями на управление, чем MOSFET и IGBT. Серьезным недостатком этого типа приборов является их открытое состояние при отсутствии управляющего сигнала. Это обуславливает необходимость подачи напряжения запирающего JFET транзисторов перед подачей напряжения на силовую часть схемы. По этой причине использование JFET транзисторов в бортовых инверторах не рассматривается.

В настоящее время IGBT выпускаются только на основе кремния (Si), а MOSFET – как на основе кремния, так и на основе карбида кремния (SiC). При близких сопротивлениях открытого канала SiCMOSFET демонстрирует значительно меньшие времена переключения, меньшие динамические потери и в четыре раза меньший заряд затвора по сравнению с SiMOSFET. Сравнение произведено на основе параметров IXFX80N60P3[6] и C2M0080120D

[5]. По температурным характеристикам SiCMOSFET также превосходит кремниевый аналог. Для Si приборов предельной температурой перехода считается $T_j=150^{\circ}\text{C}$, тогда как для SiC приборов она составляет от $T_j=175^{\circ}\text{C}$ до $T_j=225^{\circ}\text{C}$, по разным источникам. Тем не менее преимущество SiCMOSFET перед SiIGBT не столь очевидно. При одинаковых номинальных токах и напряжениях статические потери в ключах сравнимы, как и времена нарастания/спада напряжения. Однако, SiIGBT ключи значительно дешевле и лучше изучены. Для корректного сравнения произведем расчет потерь в полумостовых модулях различных типов. Основные параметры схемы и ее режима работы приведены в таблице 1.

Таблица 1. Условия работы модулей

Параметр	Значение
Схема подключения	Трехфазный инвертор
Вид модуляции	Синусоидальная, ШИМ
Напряжение звена постоянного тока V_{DC}	600 В
Ток двигателя (действующий) I_{OUT}	50 А
Температура охладителя T_s	80°C
Частота ШИМ f_{sw}	10..100 кГц
$\text{Cos}(\varphi)$	0,95
Тепловое сопротивление корпус-охладитель R_{CS}	$0,05^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$

Сравнение потерь будет производиться на примере модулей SKM200GB125DN компании Semikron и CAS100H12AM1 компании Cree (см. таблицу 2).

Таблица 2. Основные параметры рассматриваемых модулей

Параметр	SKM100GB125DN	CAS100H12AM1
Материал	Si	4H-SiC
Тип ключа	NPTIGBT (Ultrafast)	MOSFET
Номинальный ток	100 А	100 А
Номинальное напряжение	$U_{кз}=1200\text{ В}$	$U_{си}=1200\text{ В}$
Заряд затвора	650 нКл	490 нКл
Напряжение управления	17 В	20 В
Тип обратного диода	CAL	SiCSchottky
Предельная температура кристалла	150°C	150°C
Максимальная мощность	450 Вт	568 Вт
Тепловое сопротивление кристалл-корпус одного транзистора $R_{JC(IGBT/MOSFET)}$	$0,18^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	$0,23^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$
Тепловое сопротивление кристалл-корпус одного диода $R_{JC(FRD)}$	$0,5^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	$0,36^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$
Масса	160 г	150 г

Расчет потерь в IGBT модуле проводился согласно рекомендациям производителя [9] по следующим формулам:

$$m = \frac{2V_{out}}{V_{DC}} ;$$

$$P_{COND(IGBT)} = \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m \cdot \cos(\varphi)}{8} \right) \cdot V_{CE0} \cdot I_1 + \left(\frac{1}{8} + \frac{m \cdot \cos(\varphi)}{3\pi} \right) \cdot R_{CE} \cdot I_1^2;$$

$$P_{SW(IGBT)} = f_{SW} \cdot E_{ON+OFF} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_{OUT}}{I_{REF}} \cdot \left(\frac{V_{CC}}{V_{REF}} \right)^{Kv1} \cdot (1 + TC_{Esw} \cdot (T_{J(IGBT)} - T_{REF}));$$

$$P_{TOT(IGBT)} = P_{COND(IGBT)} + P_{SW(IGBT)};$$

$$P_{COND(FRD)} = \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{m \cdot \cos(\varphi)}{8} \right) \cdot V_{F0} \cdot I_1 + \left(\frac{1}{8} - \frac{m \cdot \cos(\varphi)}{3\pi} \right) \cdot R_F \cdot I_1^2;$$

$$P_{SW(FRD)} = f_{SW} \cdot E_{RR} \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_{OUT}}{I_{REF}} \right)^{Ki} \cdot \left(\frac{V_{CC}}{V_{REF}} \right)^{Kv2} \cdot (1 + TC_{Err} \cdot (T_{J(FRD)} - T_{REF}));$$

$$P_{TOT(FRD)} = P_{COND(FRD)} + P_{SW(FRD)};$$

где:

E_{ON+OFF} – номинальные динамические потери в IGBT за один цикл переключения;

E_{RR} – номинальные динамические потери в FRD за один цикл переключения;

I_1 – амплитудное значение тока в линейном проводнике;

I_{REF} – номинальное значение тока через ключ;

$Ki = 0.6$, $Kv1 = 1.4$, $Kv2 = 0.6$ – эмпирические коэффициенты;

$P_{COND(IGBT)}$, $P_{COND(FRD)}$ – мощности статических потерь;

$P_{SW(IGBT)}$, $P_{SW(FRD)}$ – мощности динамических потерь;

$P_{TOT(IGBT)}$, $P_{TOT(FRD)}$ – суммарные мощности потерь;

R_{CE} – активное сопротивление коллектор-эмиттер IGBT;

R_F – активное сопротивление анод-катод FRD;

$TC_{Esw} = 0.003$, $TC_{Err} = 0.006$ – температурные коэффициенты потерь;

T_{REF} – номинальная температура кристалла;

$T_{J(IGBT)}$, $T_{J(FRD)}$ – фактические температуры кристаллов;

V_{CC} – действующее значение линейного напряжения;

V_{CE0} – напряжение открытия коллектор-эмиттер IGBT;

V_{out} – амплитудное значение линейного напряжения;

V_{F0} – напряжение открытия перехода анод-катод FRD;

Температуры корпуса и кристаллов вычисляются по следующим формулам:

$$T_C = 2 \cdot (P_{TOT(IGBT)} + P_{TOT(FRD)}) \cdot R_{CS} + T_S;$$

$$T_{J(IGBT)} = P_{TOT(IGBT)} \cdot R_{JC(IGBT)} + T_C;$$

$$T_{J(FRD)} = P_{TOT(FRD)} \cdot R_{JC(FRD)} + T_C;$$

где:

T_C – температура корпуса.

Формулы для расчета потерь и температур в MOSFET модуле аналогичны формулам для IGBT, за исключением формулы статических потерь в транзисторе [8]:

$$P_{COND(MOSFET)} = \left(\frac{1}{8} + \frac{m \cdot \cos(\varphi)}{3\pi} \right) \cdot R_{DS} \cdot I_1^2,$$

где

$P_{COND(MOSFET)}$ – мощность статических потерь в MOSFET;

R_{DS} – сопротивление сток-исток MOSFET.

Температурные коэффициенты потерь MOSFET модуля составляют $TC_{Esw} = -0.0015$ и $TC_{Err} = 0.0005$. Полученные результаты приведены на рисунках 1..4.

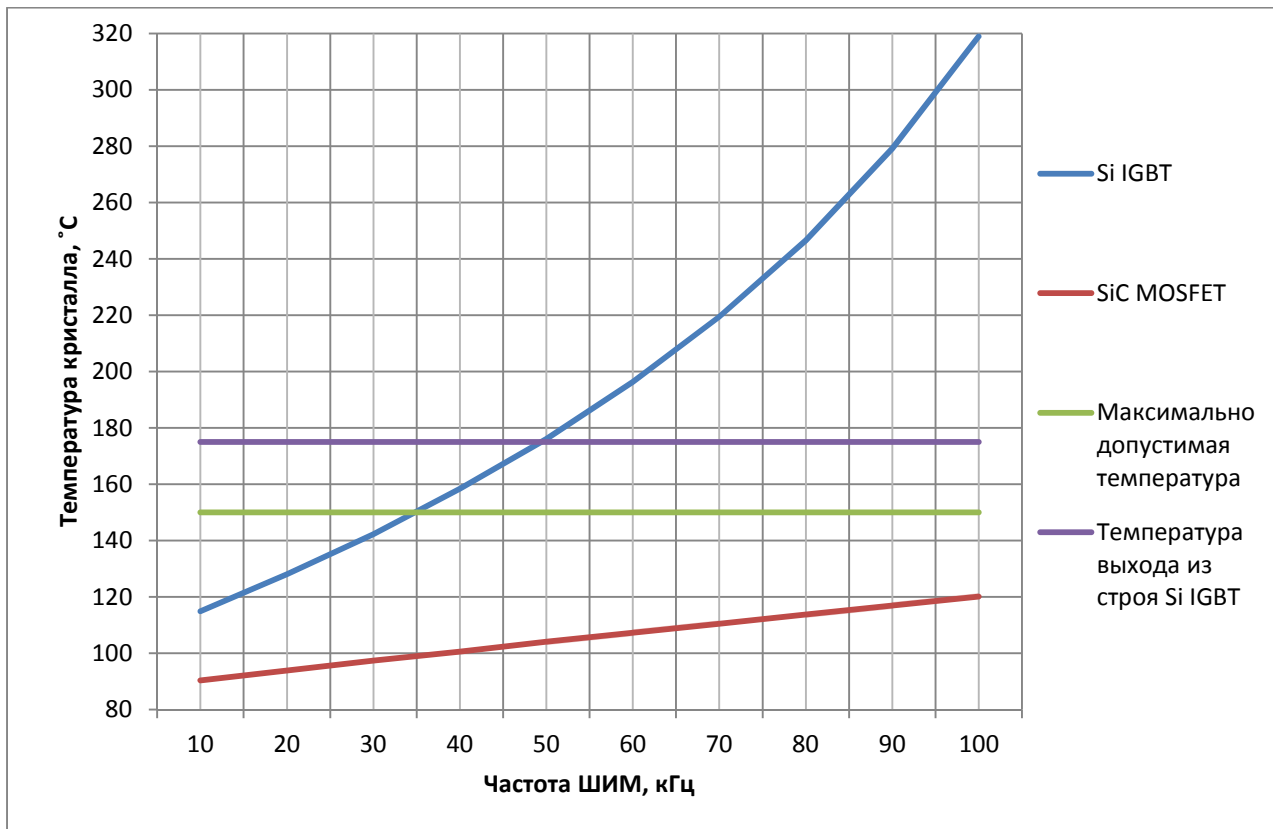


Рисунок 1. Зависимость температур кристаллов транзисторов от частоты ШИМ

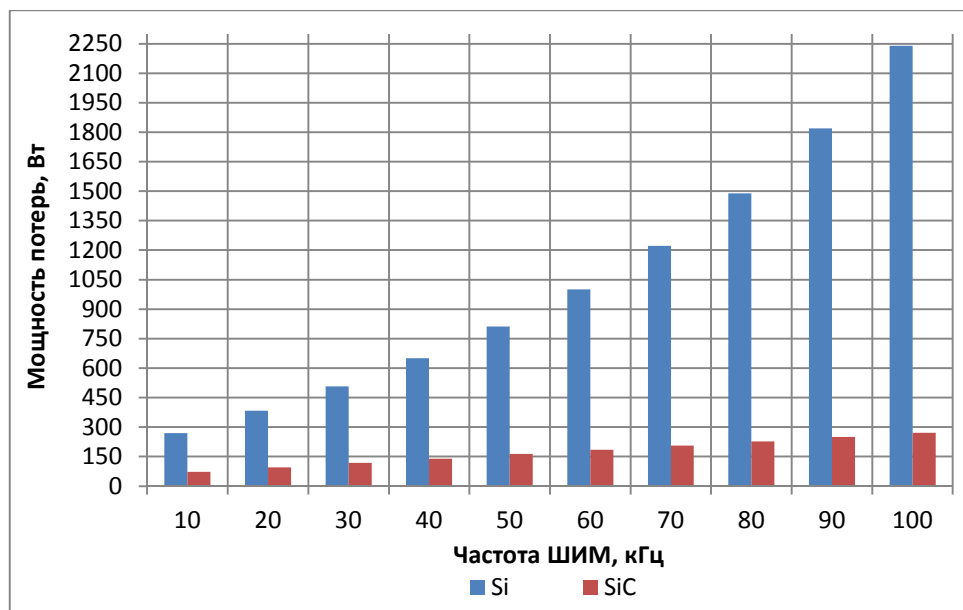


Рисунок 2. Зависимость мощностей потерь модулей от частоты ШИМ

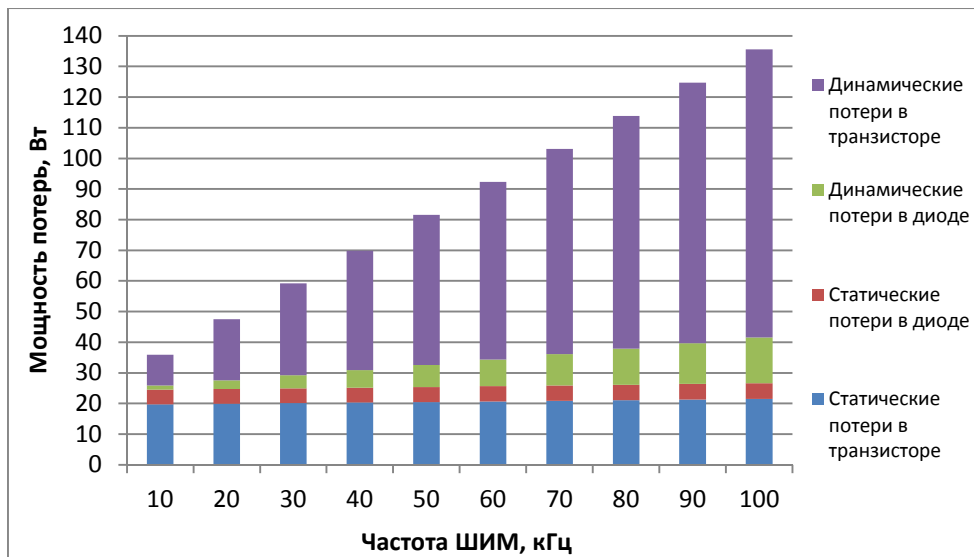


Рисунок 3. Структура потерь в модуле CAS100H12AM1

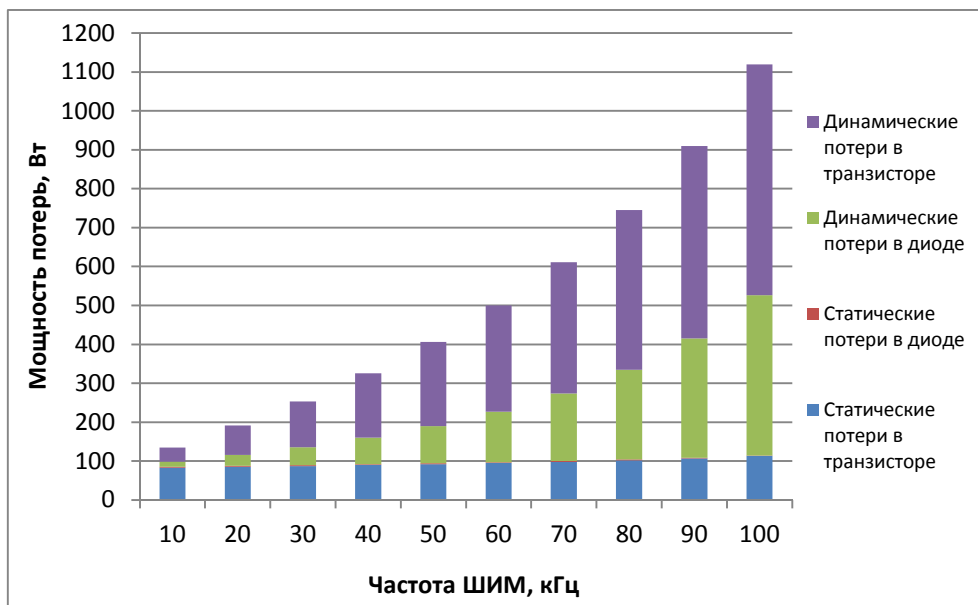


Рисунок 4. Структура потерь в модуле SKM100GB125DN

Расчет потерь при помощи специализированного ПО SEMISEL компании Semikron подтвердил полученные результаты. Показанные на рисунках 1, 2 и 4 графики мощностей и температур модуля SKM100GB125DN приведены для случая бесконечной термостойкости. Фактически, перегрузка кристаллов IGBT по температуре происходит при частоте ШИМ 35 кГц, а выход из строя – не более чем при 50 кГц (см. рис. 1). При этом кристаллы MOSFET модуля CAS100H12AM1 при частоте 100 кГц разогреваются лишь до 120 °С. Это обуславливает значительный запас по мощности на нештатные и динамические режимы работы. Габаритную мощность охладителей для модулей на основе SiC можно увеличить за счет использования металлокерамических корпусов. Так, ряд компаний предлагает SiC-MOSFET транзисторы с максимальной температурой перехода +225 °С [7].

Анализ показывает, что даже статические потери в модулях значительно различаются, а динамические потери на частоте ШИМ 50 кГц различаются более чем в 5 раз. Это

объясняется как отсутствием «хвостового» тока у SiCMOSFET, так и отсутствием эффекта обратного восстановления у SiCдиода Шоттки. Дополнительный вклад в увеличение температуры кремниевого модуля вносят положительные температурные коэффициенты динамических потерь. Результаты расчетов демонстрируют эффективность применения карбидокремниевой силовой части при частотах ШИМ до 100 кГц. Увеличение частоты ШИМ инвертора открывает новые пути к снижению массы и размеров бортовых электроприводов. Параллельно решаются задачи повышения термостойкости и увеличения надежности системы.

Выводы

В рамках работы были проведены тепловые расчеты кремниевого IGBT-CAL модуля SKM100GB125DN и карбидокремниевый MOSFET-Schottky модуля CAS100H12AM1. Полученные результаты демонстрируют меньшие потери в карбидокремниевой силовой части при частотах ШИМ от 10 до 100 кГц. В заданных условиях работы перегрузка по теплу SiIGBT модуля происходит на частоте 35 кГц. SiCMOSFET-Schottky модуль не перегружается во всем заданном диапазоне частот. В наиболее тяжелом режиме работы происходит разогрев перехода лишь до 120 °С, что обеспечивает значительный запас по мощности. Благодаря высоким динамическим характеристикам и повышенной рабочей температуре, SiC ключи перспективны для применения в авиационных электроприводах.

Список литературы

1. Аракелян А.К. Вентильные электрические машины в системах регулируемых электроприводов: Учеб. пособие для вузов: В 2 т. Т. 2 / А. К. Аракелян, А. А. Афанасьев. – М.: Высшая школа, 2006. – 518 с.
2. Балюк Н.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты / Н.В. Балюк, Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов. – М.: Группа ИДТ, 2008. – 478 с.
3. Войтович В. Si, GaAs, SiC, GaN – силовая электроника. Сравнение, новые возможности / В. Войтович, А. Гордеев, А. Думаневич // Силовая электроника. – 2010. – № 5. – С. 4-10.
4. Демут Ф. Технология SiC в модулях SEMIKRON./ Ф. Демут, А. Колпаков // Силовая электроника. – 2014. – № 1. – С. 34-38.
5. Кирстед П. Второе поколение SiCMOSFET с повышенной эффективностью и сниженной стоимостью // Силовая электроника. – 2013. – № 6. – С. 24-26.
6. Саттар А. Сравнение новейших HiPerFETMOSFETs с семейством SuperJunctionMOSFETs // Силовая электроника. – 2013. – № 6. – С. 33-36.

7. NEPTUNE - High Temperature, High Voltage Power MOSFET 1200V // Cissoid: сайт. – URL: <http://www.cissoid.com/high-temperature-electronics/ht-standard-products/neptune-%11-high-temperature%2c-high-voltage-power-mosfet-1200v.html> (дата обращения 3.05.2014).
8. Graovac D. MOSFET Power Losses Calculation Using the Data-Sheet Parameters./D. Graovac, M. Pürschel, A. Kiep // Infineon: Application Note, V 1.1, July 2006. – URL: http://www.btipnow.com/library/white_papers/MOSFET%20Power%20Losses%20Calculation%20Using%20the%20Data-Sheet%20Parameters.pdf (дата обращения 3.05.2014).
9. Wintrich A., Nicolai U. Application Manual: Power Semiconductors.// Semikron International GmbH: сайт. - URL: http://www.semikron.com/skcompub/en/SEMİKRON_Application_Manual_Power_Semiconductors_.pdf (дата обращения 3.05.2014).

Рецензенты:

Присмотров Н.И., д.т.н., профессор кафедры ЭПиАПУ, ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», г. Киров.

Хорошавин В.С., д.т.н., профессор кафедры ЭПиАПУ, ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», г. Киров.