

Силовые полупроводниковые ключи

для преобразователей частоты систем индукционного нагрева

В данной статье представлены результаты работы в области проектирования силовых полупроводниковых ключей для преобразователей частоты, применяемых в технологии индукционного нагрева металлов. Новые разработки специалистов ОАО «Электровыпрямитель» позволяют потребителю наиболее рационально реализовывать схемотехнические решения при построении источников питания систем индукционного нагрева, улучшив их эффективность, минимизировав стоимость и габариты преобразователей.

**Алексей Гришанин
Вячеслав Мускатиньев
Алексей Бормотов**

martin@moris.ru

Введение

Индукционный нагрев как высокоэффективный способ термообработки при воздействии на металл переменных токов высокой частоты широко распространен в различных областях промышленности (пайка, закалка, плавка, литье и т. д.). В качестве источников питания систем индукционного нагрева для всего многообразия технологических процессов применяются частотные преобразователи со звеном постоянного тока на основе комбинации сетевого выпрямителя и однофазного автономного инвертора. Автономные инверторы таких схем могут быть выполнены в качестве инвертора тока или напряжения, с использованием различных типов силовых полупроводниковых ключей [1–3].

Наиболее эффективное регулирование электрических режимов электротермических установок большой и средней мощности обеспечивается применением тиристорных преобразователей повышенной частоты (от 500 Гц до 22 кГц) на основе автономных инверторов тока. Зачастую автономный инвертор в тиристорных преобразователях частоты выполнен по несимметричной схеме на одном тиристоре с диодом обратного тока, показавшей высокую эффективность в установках индукционного нагрева [1]. Другой тип автономных инверторов характеризуется использованием генератора постоянного напряжения на входе, что дает возможность наиболее просто реализовать схемы источников питания для индукционных систем, работающих на высоких частотах (66–440 кГц) при сравнительно низких мощностях. Схемы инверторов напряжения, как правило, строятся на полностью управляемых ключах [2].

Силовые полупроводниковые приборы (диоды, тиристоры, транзисторы с изолированным затво-

ром) являются ключевыми элементами инверторной части схем преобразователей частоты для систем индукционного нагрева. Исследования и опыт эксплуатации таких систем показывают, что уровень надежности преобразователей частоты в основном определяется надежностью силовых полупроводниковых приборов и зависит от их параметров и характеристик, эффективности охлаждения и схемы управления [4]. Целью данной статьи является краткое знакомство разработчиков преобразователей частоты для питания систем индукционного нагрева с новыми изделиями силовой электроники производства ОАО «Электровыпрямитель», ориентированными на применение в данной технологии.

Тиристоры с асимметричной блокирующей характеристикой

В качестве коммутирующих элементов силовой части несимметричной одноячейковой схемы автономного инвертора с удвоением частоты, получившей широкое распространение в схемотехнике источников питания мощных систем индукционного нагрева, используется встречно-параллельное соединение частотных тиристора VS и обратного диода VD (рис. 1). Силовые коммутирующие элементы — конденсатор C и индуктивность нагрузки L — обеспечивают колебательный характер выходного тока. Работа автономного инвертора характеризуется наличием резонансного режима, при котором реализуется необходимая длительность интервала протекания тока через обратный диод. Этот интервал обеспечивает коммутационную устойчивость автономного инвертора во время восстановления тиристора [5]. Таким образом, обратные диоды в тиристорном инверторе «сбрасывают» излишнюю ре-

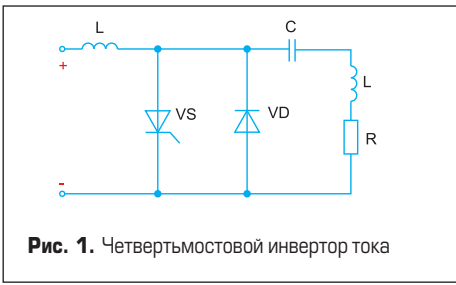


Рис. 1. Четвертьмостовой инвертор тока

активную мощность колебательного контура нагрузки и стабилизируют напряжение на силовых элементах тиристорного преобразователя частоты при переменной нагрузке [6].

Частота является очень важным параметром при индукционном нагреве, потому что она, прежде всего, определяет глубину проникновения тока и, следовательно, глубину нагрева. Частота также является важным параметром при проектировании источников питания индукционного нагрева, так как силовые полупроводниковые приборы этих источников выбирают в зависимости от частоты, на которой они функционируют [7]. Развитие силовой полупроводниковой электроники, в частности, в области проектирования частотных быстродействующих тиристоров, изготавливаемых на основе четырехслойных полупроводниковых $p-n-p-n$ -структур, связано с одновременным повышением быстродействия и коммутируемой мощности. Однако эти требования противоречивы: увеличение напряжения ограничивается критической величиной напряженности поля, превышение которой приводит к электрическому пробое кремниевой структуры, а снижение напряженности за счет увеличения базовых слоев полупроводниковой структуры приводит, как правило, к утрате быстродействия приборов и повышенным энергетическим потерям во включенном состоянии.

Как видно из схемы, приведенной на рис. 1, от тиристора не требуется обратного блокируемого напряжения, поскольку подключенный встречно-параллельно диод будет выводить обратный ток нагрузки, минуя тиристор. В соответствии с особенностями схемы обратное напряжение на тиристоре будет складываться из прямого падения напряжения на диоде и падения напряжения, обусловленного паразитной индуктивностью шин, соединяющих тиристор и диод. Таким образом, тиристорам, применяемым в подобных схемах, нет необходимости иметь высокую блокирующую способность в обратном направлении.

Одним из эффективных решений повышения рабочих частот является создание тиристоров с асимметричной блокирующей характеристикой на основе пятислойной кремниевой структуры $p^+-n^--n-p-n^+$ -типа. Схемотехническая особенность использования тиристоров со встречно-параллельным диодом позволяет существенно улучшить основные электрические параметры тиристора за счет создания в слаболегированной n -базе буферного n^+ -слоя. Буферный n^+ -слой предотвращает проникновение области пространственного заряда коллекторного $p-n$ -перехода вглубь n -базы до смыкания с анодным p^+ -эмиттером (эффект «прокола»), что позволяет значительно снизить суммарную толщину n -базы при заданном значении величины блокируемого напряжения, уменьшить значение импульсного напряжения в открытом состоянии и время выключения, снизить коммутационные потери и улучшить частотные характеристики. Однако при этом существенно снижается величина обратного напряжения. Это напряжение, как правило, составляет 5–10 В. Тиристоры с $n^+-p-n-n^+$ -структурами, допустимые обратные напряжения которых намного меньше допустимых напряжений в закрытом состоянии, получили название «асимметричные».

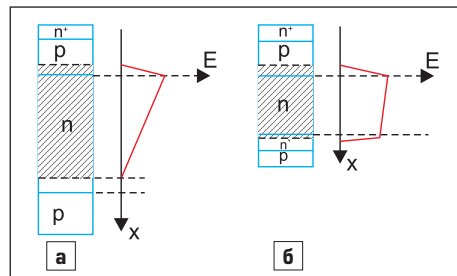


Рис. 2. Структура и распределение электрического поля $n^+-p-n-p$ -тиристора с симметричной блокирующей способностью и асимметричного $n^+-p-n-n^+-p$ -тиристора: а) тиристор с симметричной блокирующей способностью; б) асимметричный тиристор

На рис. 2 представлены структура и распределение электрического поля тиристора с симметричной блокирующей способностью и асимметричного тиристора, спроектированных для эксплуатации при одинаковых блокирующих напряжениях.

Номенклатура асимметричных тиристоров производства ОАО «Электровыпрямитель»

и их основные параметры приведены в табл. 1.

Приборы изготовлены на кремниевых структурах диаметром 24, 32, 40, 56 мм и собраны в металлокерамические корпуса таблеточной конструкции (рис. 3). Вид климатических исполнений тиристоров УХЛ и Т по ГОСТ 15150. Диапазон рабочих температур $-60...+125^{\circ}\text{C}$. Тиристоры обладают повышенной механической прочностью, надежно работают при воздействии вибрационных нагрузок в диапазоне частот 1–2000 Гц с ускорением 200 м/с^2 , а также при одиночных и многократных ударах с ускорением, соответствующим 10000 и 1500 м/с^2 . В данной серии частотных тиристоров используются новые конструктивные решения и передовые технологические процессы изготовления: имплантация фосфора при создании однородного буферного n^+ -слоя и технология электронного облучения с целью регулирования времени выключения тиристора.



Рис. 3. Частотные тиристоры серии ТАИ

Улучшение частотных характеристик достигается за счет снижения энергии потерь не только в процессе выключения, но и в процессе включения, поскольку используется оригинальная топология управляющего разветвленного электрода с внутренним усилением, которая увеличивает область первоначального включения и сокращает длительность этапа распространения включенного состояния. Благодаря надежному включению и малым коммутационным потерям тиристоры серии ТАИ способны работать на частотах до нескольких десятков килогерц. Эффективная шунтировка катодного эмиттера обеспечивает прибору длительную эксплуатацию в режиме высоких скоростей нарастания прямого напряжения ($dv_D/dt \geq 1000\text{ В/мкс}$). Улучшение характеристик асимметричных тиристоров по сравнению с частотными тиристорами с симметричной блокирующей характеристи-

Таблица 1. Основные параметры асимметричных тиристоров

Тип	V_{DRM}/V_{RRM}	$I_{T(AV)}(T_C, ^{\circ}\text{C})$	$I_{TSM}(10\text{мс})$	$V_{T(ТО)}(T_{VJM})$	$r_T(T_{VJM})$	$(di_T/dt)_{cr}(T_{VJM})$	$(dv_D/dt)_{cr}(T_{VJM})$	t_{off}	$t_q(T_{VJM})$	$R_{th(j-c)}$	T_{VJM}
	В	А	кА	В	мОм	А/мкс	В/мкс	мкс	мкс	$^{\circ}\text{C/Вт}$	$^{\circ}\text{C}$
ТАИ123-250	600–1500/7	250(92)	3,0	1,20	0,95	1000	1000	2,0–3,2	8–16	0,070	125
ТАИ133-500	600–1500/7	500(93)	6,5	1,10	0,55	1000	1000	2,0–3,2	8–16	0,035	125
ТАИ143-800	600–1500/7	800(86)	10,5	1,10	0,25	1000	1000	2,0–3,2	8–16	0,028	125
ТАИ153-800	2400–3400/7	815(85)	16,0	1,65	0,40	1000	1000	2,0–3,2	40–63	0,020	125
ТАИ253-1000	1000–1500/7	1000(80)	16,0	1,60	0,25	1000	1000	2,0–3,2	8–12,5	0,020	125

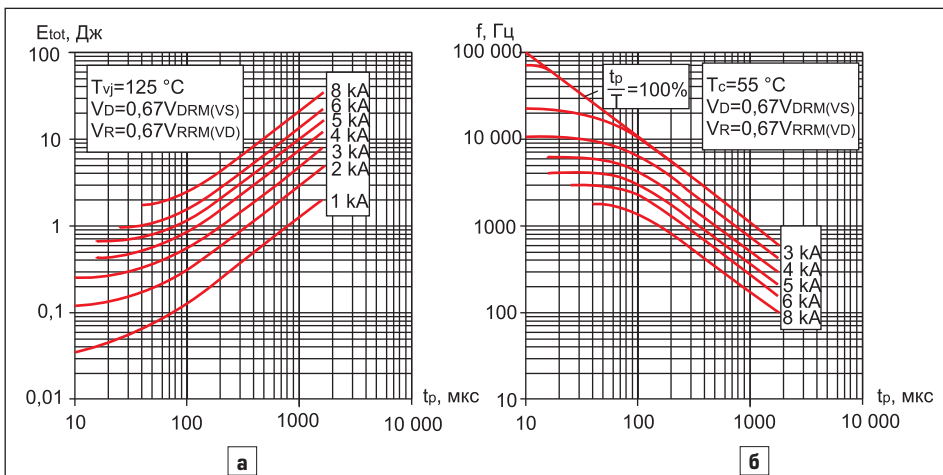


Рис. 4. а) Суммарная энергия потерь тиристора ТАИ153-800 на один импульс тока синусоидальной формы; б) зависимость рабочей частоты тиристора ТАИ153-800 от длительности импульсов тока синусоидальной формы

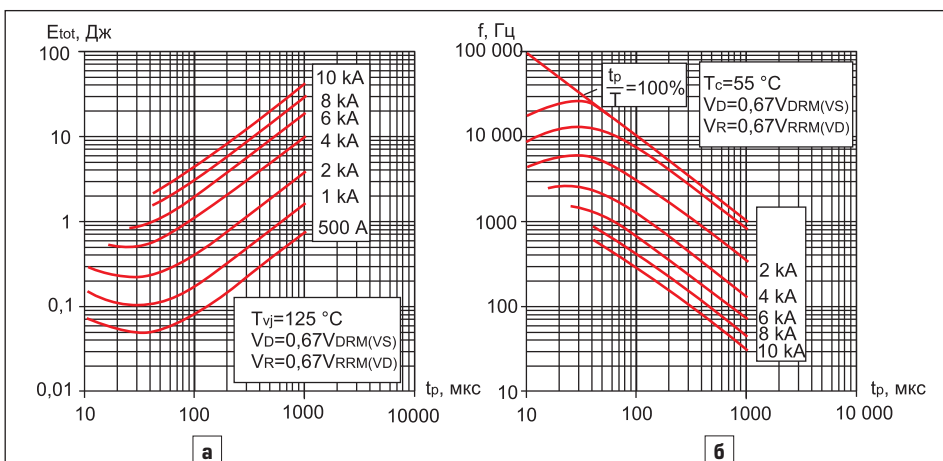


Рис. 6. а) Суммарная энергия потерь модуля МТАИДЧ-400-16 на один импульс тока синусоидальной формы; б) зависимость рабочей частоты модуля МТАИДЧ-400-16 от длительности импульсов тока синусоидальной формы

кой тем заметнее, чем выше их напряжение переключения.

На рис. 4 приведены частотные характеристики тиристора ТАИ153-800-34 — самого мощного из представленной серии.

Тиристорно-диодный модуль на основе асимметричного тиристора

Современный рынок преобразователей для индукционного нагрева требует постоянного снижения стоимости и габаритных размеров преобразователей. Для успешного решения этих задач необходимо повышать эффективность работы силовых ключей. Основными направлениями развития силовой электроники являются рост коммутируемой единичным

ключом мощности, увеличение степени интеграции и эффективности систем охлаждения. Значительный эффект в схемах автономных инверторов тока может дать переход на модульное исполнение встречно-параллельного соединения тиристор-диод. Модульное исполнение имеет определенные преимущества перед дискретными асимметричными тиристорами и быстро восстанавливающимися диодами, соединенными встречно-параллельно: удобство монтажа (один корпус вместо двух), сокращение паразитной индуктивности шин, соединяющих полупроводниковые элементы, меньшая стоимость.

Специально для применения в источниках питания систем индукционного нагрева разработан частотный тиристорно-диодный модуль на основе асимметричного импульс-



Рис. 5. Частотный тиристорно-диодный модуль МТАИДЧ-400-16

ного тиристора и быстро восстанавливающегося диода с диаметром полупроводникового элемента 40 мм (рис. 5).

Модуль МТАИДЧ-400-16 рассчитан на ток 400 А, прямое напряжение до 1600 В и оптимизирован для применения в схемах источников питания преобразователей повышенной частоты для индукционного нагрева. Основные параметры модуля приведены в табл. 2.

Приборы имеют низкие времена выключения тиристора и обратного восстановления диода, высокую стойкость к $(di_T/dt)_{cr}$, $(dv_D/dt)_{cr}$. Частотные характеристики модуля МТАИДЧ-400-16 приведены на рис. 6.

На рис. 7-10 приведены основные характеристики модуля и зависимости параметров от режимов работы в схеме.

Приборы выполнены в прочных пластмассовых корпусах, основание изолировано от силового и управляющего выводов с помощью теплопроводящей керамики из нитрида алюминия. Напряжение изоляции более 3 кВ. Ширина медного основания модуля 60 мм. Модульная конструкция соединения тиристора и диода в сочетании с внутренней изоляцией позволяет существенно упростить конструкцию силовой схемы, снизить издержки монтажа и обслуживания преобразовательного устройства. Прецизионные прижимные контактные соединения в модулях обеспечивают надежную работу при длительной эксплуатации в циклическом режиме.

Новый тип модуля позволяет разработчику схем частотных преобразователей реализовать два возможных варианта соединения тиристора и диода — встречно-параллельное и последовательное. Для встречно-параллельного необходимо с помощью шины соединить силовые выводы катода тиристора и анода диода. С целью минимизации паразитных индуктивностей необходимо использовать многослойные силовые шины. Применение модуля по дан-

Таблица 2. Основные параметры модуля МТАИДЧ-400-16

Тип	V_{DRM}	V_{RRM}	$I_{T(AV)}(T_c, ^\circ C)$	$I_{TSM}(10мс)$	$V_{T(TO)}(T_{VJM})$	$r_T(T_{VJM})$	$(di_T/dt)_{cr}(T_{VJM})$	$(dv_D/dt)_{cr}(T_{VJM})$	$t_q/t_{rr}(T_{VJM})$	$R_{th(j-c)}$	T_{VJM}	V_{isol}
	В	В	А	кА	В	МОм	А/мкс	В/мкс	мкс	$^\circ C/Вт$	$^\circ C$	В
МТАИДЧ-400	1200-1600	7 ¹⁾	400 (69)	7,0	1,80	0,53	1000	1000	12/1,5	0,060/0,030	125	3000
		1200-1600 ²⁾										

Примечание: ¹⁾ для встречно-параллельного соединения тиристора и диода; ²⁾ для последовательного соединения тиристора и диода

ной схеме соединения позволяет проектировать вентильные ячейки, проводящие ток в обратном направлении в преобразователях с естественной коммутацией без приложения обратного напряжения.

Для реализации вентильной ячейки с обратной блокирующей способностью силовые выводы модуля не закорачиваются. Благодаря этому можно получить последовательное соединение асимметричного тиристора и быстродействующего диода.

Низкие потери разработанных приборов открывают широкие возможности для раз-

работки новых устройств источников питания с большим коэффициентом полезного действия преобразуемой мощности.

IGBT-модуль с SiC-диодами Шоттки

Вместе с развитием полупроводниковых компонентов силовой электроники совершенствуется и схемотехника преобразователей частоты для индукционного нагрева [8]. Согласно явлению электромагнитной индукции, эффект нагрева растет с увеличением частоты переменного тока. Разработка транзисторных преобразователей в диапазонах мощностей (сотни киловатт) и высоких частот (десятки килогерц) представляет собой сложную техническую проблему. Для решения поставленной задачи требуются более быстродействующие, чем выпускаемые сегодня, силовые электронные компоненты, способные эффективно работать на высоких частотах.

Основными элементами мощных высокочастотных преобразователей являются

полностью управляемые ключи — биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). Производимые сегодня мощные IGBT-модули предназначены в основном для традиционных применений (электропривод, электроэнергетика, агрегаты бесперебойного питания) и остаются сравнительно низкочастотными. В ОАО «Электровыпрямитель» разработана и внедрена в производство серия IGBT-модулей на токи 25–4800 А, напряжения 600–6500 В. Модули выпускаются по схемам одиночных ключей, чопперов, полумостов и трехфазных инверторов. Они соответствуют требованиям международных стандартов и взаимозаменяемы со многими зарубежными аналогами, продающимися на российском рынке. В настоящее время предприятием производятся IGBT-модули на основе кристаллов нескольких поколений, отличающихся технологией изготовления. В модулях предусмотрены защитные диоды обратного тока с мягкими характеристиками обратного восстановления. Основная номенклатура этих приборов выпускается в стандартных корпусах и предназначена для статических преобразователей частоты, используемых в различных отраслях промышленности, транспорте, в энергетических системах [9].

Существенно улучшить частотные свойства IGBT технологическими приемами не удастся в силу особенностей конструкции кристаллов. Поэтому создавать высокочастотные преобразователи большой мощности для питания систем индукционного нагрева с высокими технико-экономическими характеристиками на серийных IGBT-модулях необходимо за счет применения новой схемотехники и новых способов управления.

Большинство схемотехнических решений инверторов устройств питания используют обратные SFRD-диоды. Энергия потерь IGBT-транзистора при его включении зависит от характеристики обратного восстановления встречно-параллельного SFRD-диода. Применение диодов на основе SiC в сочетании с новой схемотехникой позволяет эффективно использовать IGBT-модули в мощных преобразователях для технологий индукционного нагрева на частотах 20–100 кГц.

Одной из последних разработок в данном направлении является частотный IGBT-модуль с диодами Шоттки M2TKI-50-12ЧШ (рис. 11) для преобразователей частоты систем индукционного нагрева с частотой коммутации до 50 кГц. Модуль выполнен по схеме полумоста с частотным IGBT и встроенным быстродействующим SiC-диодом Шоттки на ток 50 А и напряжение 1200 В.

Преимущества разработанного модуля M2TKI-50-12ЧШ с SiC-диодами Шоттки по отношению к аналогичному модулю M2TKI-50-12Ч с комплектными SFRD-диодами на основе Si:

- снижение энергии коммутационных потерь при включении транзистора E_{on} на 65%;
- снижение энергии коммутационных потерь при обратном восстановлении диода E_{rec} в 13 раз;

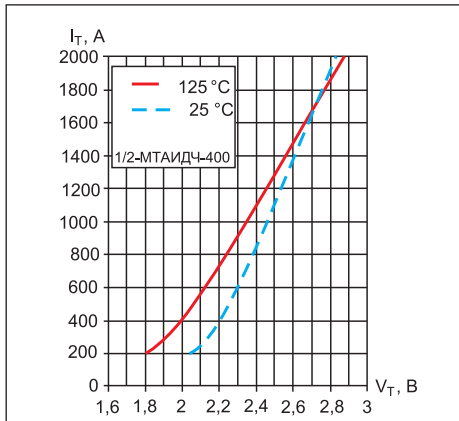


Рис. 7. Предельные вольт-амперные характеристики модуля МТАИДЧ-400-16 в открытом состоянии

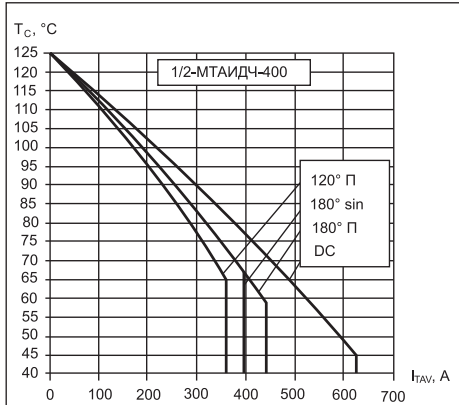


Рис. 8. Максимально допустимая температура корпуса модуля МТАИДЧ-400-16 при различных углах управления и различных формах тока

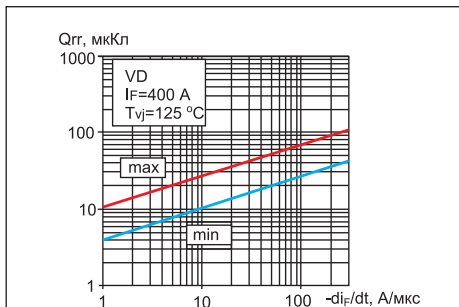
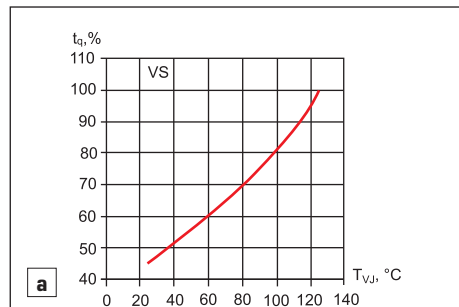
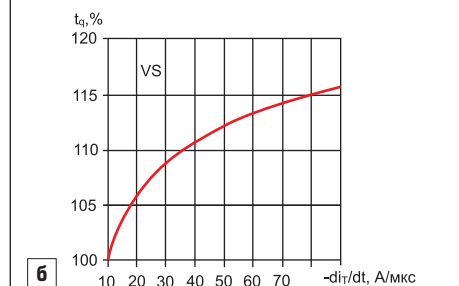


Рис. 9. Зависимость заряда обратного восстановления диода модуля МТАИДЧ-400-16 от скорости спада тока



а)



б)

Рис. 10. а) Зависимость времени выключения тиристора модуля МТАИДЧ-400-16 от температуры перехода; б) зависимость времени выключения от скорости спада тока в открытом состоянии

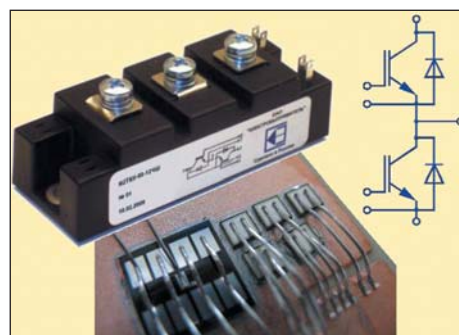


Рис. 11. Модуль M2TKI-50-12ЧШ

- практически нулевой заряд обратного восстановления диода Q_{rr}

На рис. 12 приведены сравнительные осциллограммы в период коммутационных переключений вышеуказанных модулей.

За счет применения разработанных модулей в источниках питания систем индукционного нагрева и, в частности, за счет уменьшения потерь в силовых ключах и демпферных цепях можно достичь повышения выходной мощности, снижения габаритных размеров преобразователя и сократить его стоимость.

Заключение

Представленные разработки силовых полупроводниковых ключей производства ОАО «Электровыпрямитель» позволяют потребителю наиболее рационально реализовывать схемотехнические решения при построении источников питания систем индукционного нагрева, увеличив их эффективность, минимизировав стоимость и габариты преобразователей. Более подробная информация о производимых компанией СПП представлена в разделе «Полупроводниковые приборы силовой электроники» на сайте www.elvpr.ru. Кроме того, при необходимости специалисты ОАО «Электровыпрямитель» имеют возможность разработать СПП по требованиям потребителя для конкретных условий работы и оказать помощь в комплектации сопутствующими компонентами (драйверами управления, системами прижима и охлаждения, датчиками температуры и пр.).

Литература

1. Зинин Ю. Проектирование регулируемых тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2008. № 4.

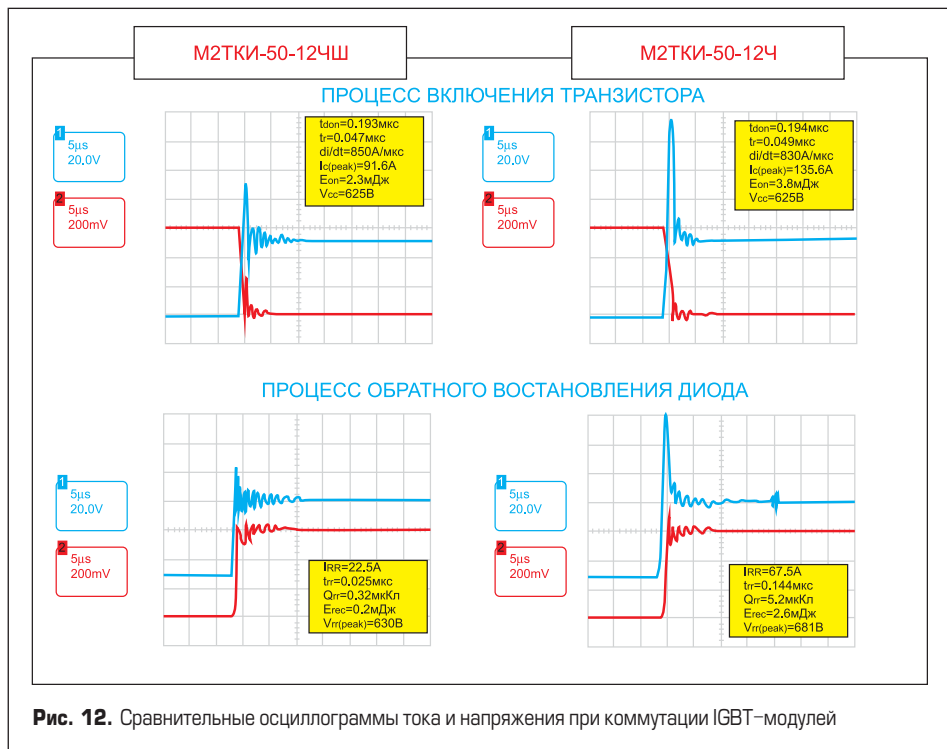


Рис. 12. Сравнительные осциллограммы тока и напряжения при коммутации IGBT-модулей

2. Силкин Е. Параллельные инверторы напряжения для электротермии // Силовая электроника. 2009. № 1.

3. Болотовский Ю., Таназлы Г. Параметры и характеристики источников питания для эффективного индукционного нагрева // Силовая электроника. 2007. № 1.

4. Аитов И., Зиннатуллин Р. Тиристорные источники питания для ответственных электротехнологических установок // Силовая электроника. 2008. № 2.

5. Валлиулина З., Зинин Ю. Проектирование тиристорного инвертно-индукторного закалочного комплекса с выходным трансформатором // Силовая электроника. 2007. № 3.

6. Зинин Ю. Схемотехническая модель индукционного комплекса с тиристорным преобразователем повышенной частоты // Силовая электроника. 2009. № 4.

7. Болотовский Ю., Таназлы Г. Обзор полупроводниковых источников питания для индукционного нагрева // Силовая электроника. 2007. № 4.

8. Силкин Е. Применение нулевых схем инверторов тока с квазирезонансной коммутацией // Силовая электроника. 2005. № 3.

9. Мускатиньев В., Мартыненко В., Чибиркин В., Бормотов А. ОАО «Электровыпрямитель» расширяет производство IGBT-модулей // Силовая электроника. 2008. № 3.