

Сравнение новейших HiPerFET MOSFETs

с семейством Super Junction MOSFETs

С выпуском третьего семейства P3 HiPerFET силовых MOSFET компания IXYS установила новую планку параметров этих устройств для средних и высоких частот. Применение новых транзисторов позволит создавать продукты, которые с высокой надежностью и эффективностью способны решить самые современные задачи преобразования высокого напряжения.

**Абдус Саттар
(Abdus Sattar)**

**Перевод:
Иван Полянский**

Новое поколение транзисторов P3 HiPerFET компании IXYS отличается оптимальной комбинацией низкого сопротивления канала в открытом состоянии, малым зарядом затвора и наличием быстрого встроенного диода для снижения Q_{rr} при улучшенной устойчивости к скорости изменения напряжения dV/dt при закрывании. Последняя особенность позволяет существенно улучшить характеристики надежности в высоковольтных приложениях.

Кроме того, специалистам компании удалось существенно снизить тепловое сопротивление R_{thjc} , поднять максимальный уровень рассеиваемой мощности и получить высокую устойчивость к лавинному режиму E_{as} . Инновации в разработке и технологии производства принесли плоды в виде существенно меньших потерь проводимости и коммутации, которые оказались сопоставимы с потерями транзисторов семейства Super Junction MOSFETs, представленными сегодня на рынке [1].

Цель данной статьи — исследование и сравнение характеристик переключения транзисторов P3 HiPerFET и Super Junction MOSFETs в одинаковых условиях. Для этого были выбраны три транзистора SJ-MOSFETs: IPW60R041C6, FCH76N60NF и STW88N65M5, которые сравнивались с транзистором HiPerFET IXFX80N60P3, поскольку данные устройства обладают схожими характеристиками.

В таблице 1 приводится сравнение основных параметров.

В соответствии с таблицей 1, IXFX80N60P3 имеет лучшие параметры Q_G , P_D , I_A и t_{rr} по сравнению с SJ-транзисторами. На рис. 1 показан график напряжения затвора и заряда затвора для IXFX80N60P3 (красный), IPW60R041C6 (синий), STW88N65M5 (голубой) и FCH76N60F (зеленый) при одинаковых условиях.

IXFX80N60P3 показывает существенно лучшую характеристику заряда затвора по сравнению с SJ MOSFETs. Преимущества применения IXFX80N60P3 хорошо видны по его характеристике на графике. Приложения с высокими частотами коммутации, например источников бесперебойного питания, будут существенно выигрывать от применения IXFX80N60P3 за счет более низкого заряда затвора Q_G и малого заряда «затвор-сток» Q_{GD} . Более низкие значения Q_G и Q_{GD} позволяют разработчику существенно улучшить параметры эффективности преобразования за счет более высоких частот коммутации, при этом потребуются

Таблица 1. Основные характеристики рассматриваемых транзисторов

Параметр	Super Junction (SJ) power MOSFETs			P3-series MOSFET
	IPW60R041C6	STW88N65M5	FCH76N60NF	IXFX80N60P3
V_{DS} , В	600	650	600	600
I_D , А	77	84	73	80
I_{DM} , А	272	336	218	200
$R_{DS(on)}$ (max), Ом	0,041	0,029	0,038	0,070
P_D , Вт	481	450	543	1300
Q_G , нКл	290	204	230	190
T_{JM} , °C	+150			
I_A , А	13	15	24	40
E_{AS} , мДж	1954	2000	7381	2000

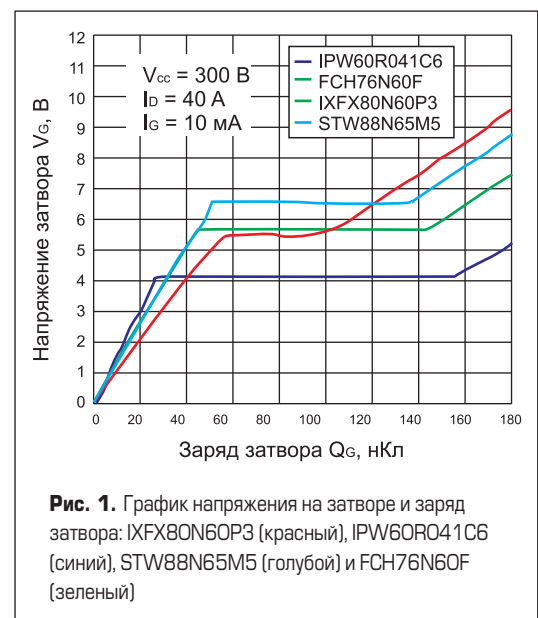


Рис. 1. График напряжения на затворе и заряда затвора: IXFX80N60P3 (красный), IPW60R041C6 (синий), STW88N65M5 (голубой) и FCH76N60F (зеленый)

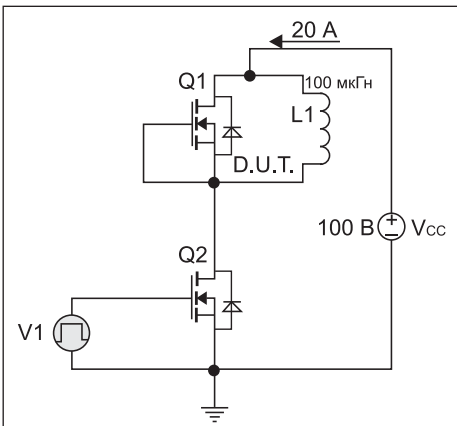


Рис. 2. Схема испытания встроенного диода MOSFET. Тестовая последовательность: $V_{CC} = 100\text{ В}$, $I_D = 20\text{ А}$, $V_{GS} = 10\text{ В}$, $L = 100\text{ мкГн}$, $di/dt = 200\text{ А/нс}$

меньшие по габаритам пассивные компоненты и уменьшится площадь печатной платы. Кроме того, низкий Q_C позволит применить драйвер управления меньшей мощности (мощность драйвера управления = $Q_C \times V_{GS} \times f_{sw}$). За счет этого можно будет дополнительно сни-

зить стоимость решения, применив менее дорогой драйвер управления [2].

Исследование поведения встроенного диода

На рис. 2 показана схема коммутации с индуктивной нагрузкой, которую применяет компания IXYS для исследования параметров встроенного диода MOSFET. Затвор и исток тестируемого транзистора Q1 закорочены. Транзистор Q2 формирует сдвоенные импульсы для испытания встроенного диода транзистора Q1. Импульсы тока через встроенный диод транзистора Q1 протекают после закрытия транзистора Q2. После чего следующий импульс управления включает транзистор Q2, и встроенный диод Q1 должен восстановить обратное сопротивление до снижения напряжения на транзисторе Q2. Во время восстановления обратного сопротивления ток через встроенный диод течет параллельно току нагрузки в транзисторе Q2. Большая скорость нарастания тока во время восстановления диода может привести к большим выбросам напряжения ($L \times di/dt$) за счет влияния паразитных индуктивностей корпуса и выводов. На рис. 3 приведены осциллограммы тестовой

Таблица 2. Параметры восстановления обратного диода при +75 °C

Наименование	t_{rr} , нс	I_{rrm} , А	Энергия восстановления E_{rr} , Дж
IXFX80N60P	200	24	$2,18 \times 10^{-4}$
IPW60R041C6	540	80	$8,72 \times 10^{-4}$
FCH76N60NF	165	30	$1,65 \times 10^{-4}$
STW88N65M5	330	52	$2,74 \times 10^{-4}$

схемы при температуре +75 °C для рассматриваемых транзисторов. Большой ток обратного восстановления диода и более длительное время его восстановления приводят к более высоким потерям.

В таблице 2 приведены измеренные значения параметров восстановления встроенного диода рассматриваемых транзисторов при температуре +75 °C. IXFX80N60P3 занял второе место по скорости обратного восстановления и минимальному пиковому току. В то же время, выбросы напряжения на FCH76N60NF достигают 320 В, на STW88N65M5 — более 350 В, на IPW60R041C6 — порядка 140 В, и существенно меньшее значение показывает IXFX80N60P3 (рис. 3а). В сравнении с IPW60R041C6 мы можем наблюдать, что время восстановления IXFX80N60P3 составляет всего 37% от време-

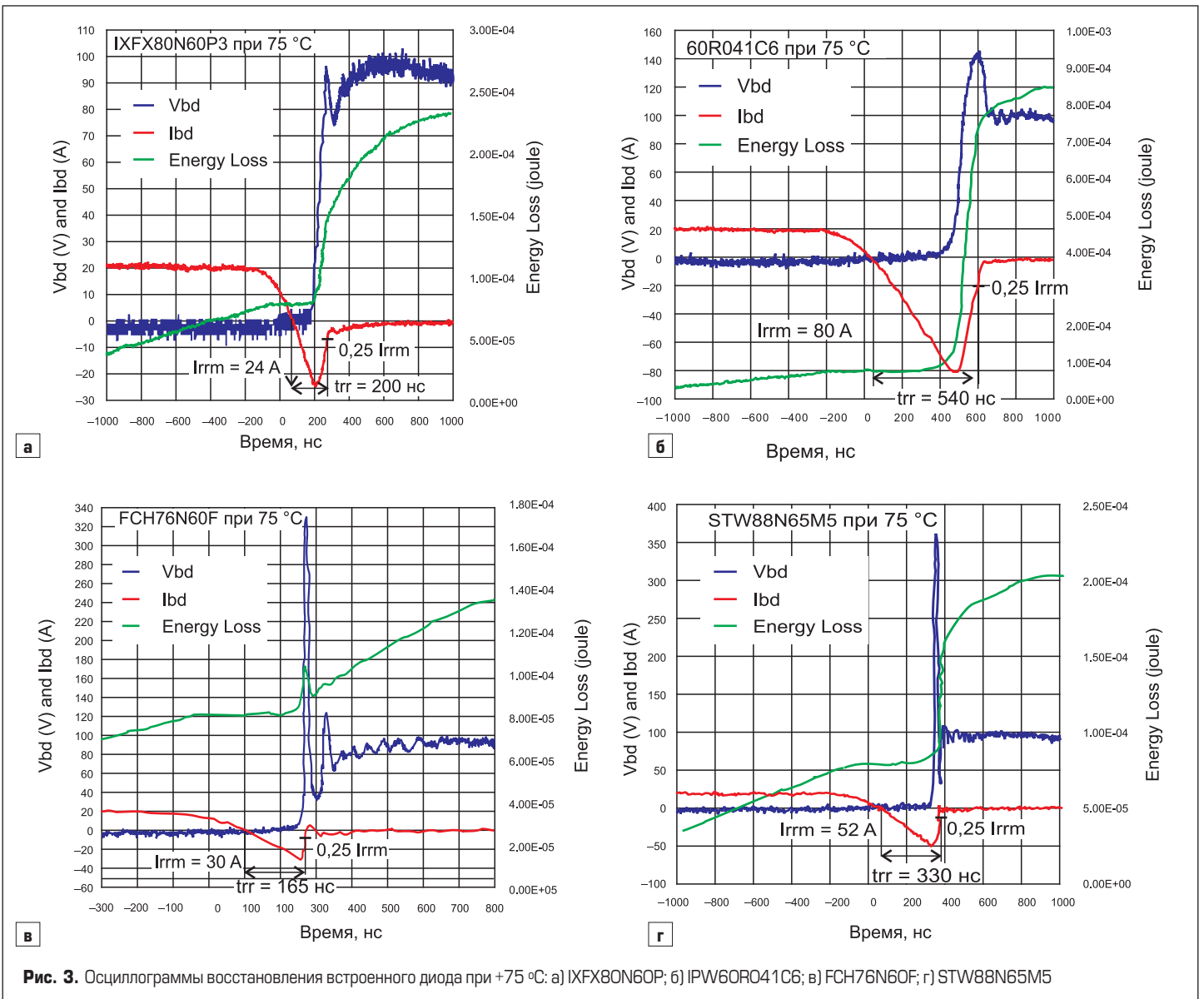


Рис. 3. Осциллограммы восстановления встроенного диода при +75 °C: а) IXFX80N60P; б) IPW60R041C6; в) FCH76N60NF; г) STW88N65M5

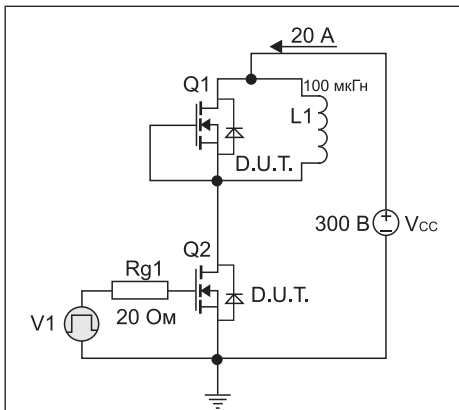


Рис. 4. Тестовая схема для определения параметров включения и выключения MOSFET

ни восстановления IPW60R041C6. При этом пиковый обратный ток IXFX80N60P3 меньше на 30%, а суммарная энергия потерь на 80% меньше, чем у IPW60R041C6.

Таким образом, особенности характеристик встроенного диода новых P3 HiPerFET MOSFET позволяют применять их без дополнительных высоковольтных защитных диодов, снижая таким образом стоимость и уменьшая площадь печатной платы по сравнению с аналогичными решениями на Super Junction MOSFET.

Характеристики выключения и включения транзисторов

Для более полного понимания особенностей новых P3 HiPerFET MOSFET рассмотрим более подробно характеристики их включения и выключения в сравнении с Super Junction MOSFET. На рис. 4 приведена тестовая схема полумостовой конфигурации с индуктивной нагрузкой. Затвор и исток верхнего транзистора Q1 закорочены. Нижний транзистор Q2 является испытуемым и включен с резистором в цепи затвора. Параметры схемы:

$$V_{CC} = 300 \text{ В}, I_D = 20 \text{ А}, V_{GS} = 15 \text{ В}, L = 100 \text{ мкГн}, R_{G1} = 20 \text{ Ом}.$$

Осциллограммы выключения транзистора при температуре +75 °C показаны на рис. 5. В данной схеме производятся измерения энергии потерь E_{off} , время спада тока стока t_{fp} , время нарастания напряжения стока t_{rv} и скорость изменения тока di/dt . Итоговые параметры измерения сведены в таблицу 3.

В соответствии с данными таблицы 3, в одинаковых условиях закрывания энергия E_{off} имеет минимальное значение для транзистора IXFX80N60P3. Времена спада тока

Таблица 3. Полученные значения параметров выключения рассматриваемых MOSFET

Наименование	E_{off} , мкДж	t_{fp} , нс	t_{rv} , нс	di/dt , А/нс
IXFX80N60P3	322	51	24	0,260
IPW60R041C6	449	87	46	0,284
FCH76N60NF	350	68	28	0,210
STW88N65M5	420	58	27	0,177

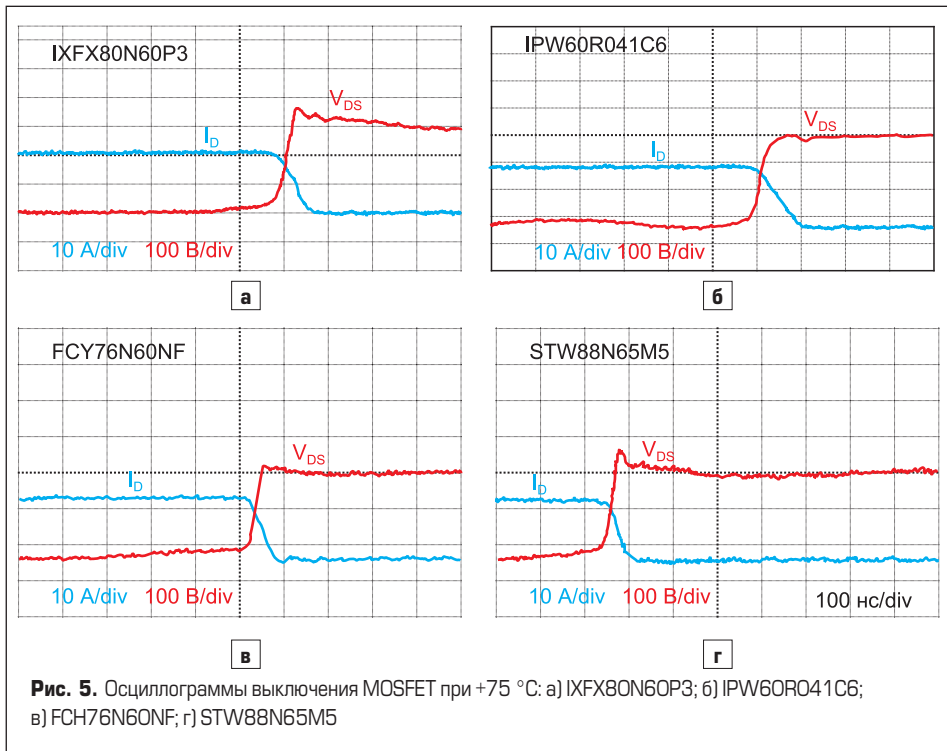


Рис. 5. Осциллограммы выключения MOSFET при +75 °C: а) IXFX80N60P3; б) IPW60R041C6; в) FCH76N60NF; г) STW88N65M5

и нарастания напряжения IXFX80N60P3 при этом также лучше, чем у Super Junction MOSFET. Таким образом, IXFX80N60P3 HiPerFET MOSFET опережает Super Junction MOSFET при закрывании. Этот же результат отражается и в скорости изменения тока di/dt [4].

На рис. 6 показаны осциллограммы включения транзисторов при температуре +75 °C. Измеряемыми параметрами являются энергия включения E_{on} , время нарастания тока стока t_{rp} , скорость спада напряжения на стоке t_{fv} и скорость изменения тока di/dt . Итоговые значения сведены в таблицу 4.

Таблица 4. Полученные значения параметров включения рассматриваемых MOSFET

Наименование	Пиковый ток, А	E_{on} , мДж	t_{rp} , нс	t_{fv} , нс	di/dt , А/нс	t_{rr} , нс	I_{RRM} , А
IXFX80N60P3	80	1,14	30	146	0,260	174	60
IPW60R041C6	89	1,39	32	149	0,284	212	68
FCH76N60NF	79	1,43	32	158	0,210	155	59
STW88N65M5	108	2,45	43	215	0,177	228	87

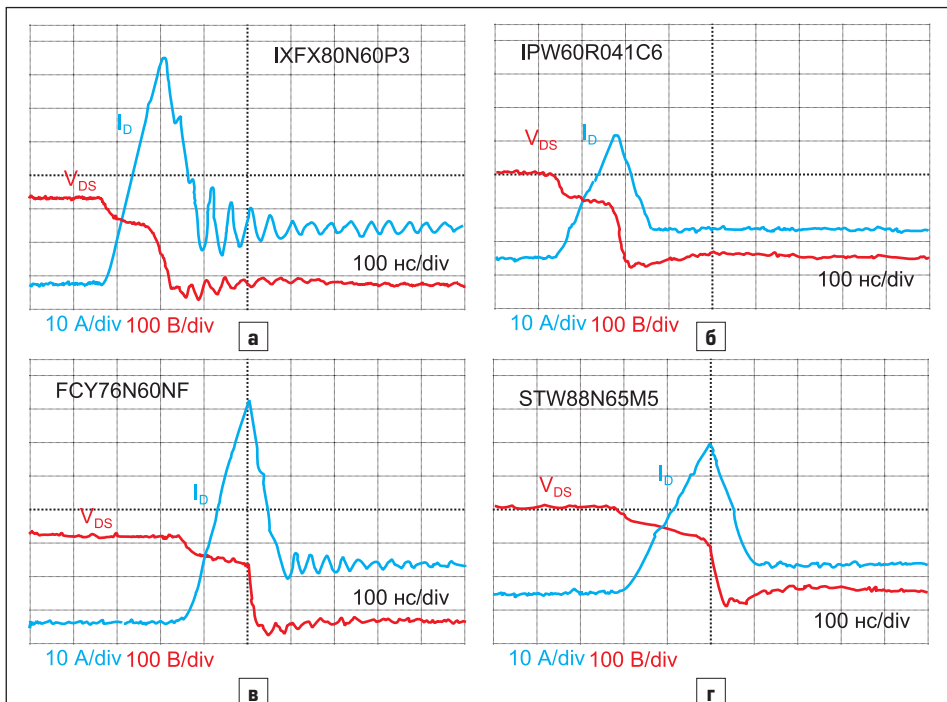


Рис. 6. Осциллограммы включения при +75 °C: а) IXFX80N60P3; б) IPW60R041C6; в) FCH76N60NF; г) STW88N65M5

Таблица 5. Потери транзисторов при +75 °С [Дж]

Наименование	Потери встроенного диода	Потери коммутации на индуктивной нагрузке		Потери проводимости при коэффициенте заполнения 50%		Общие потери на один период
	E_{rr}	E_{off}	E_{on}		MOSFET	
IPW60R041C6	$8,72 \times 10^{-4}$	$4,49 \times 10^{-4}$	$1,39 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-3}$
FCH76N60NF	$1,65 \times 10^{-4}$	$3,5 \times 10^{-4}$	$1,43 \times 10^{-3}$	$2,11 \times 10^{-3}$	$8,6 \times 10^{-5}$	$2,11 \times 10^{-3}$
IXFX80N60P3	$2,18 \times 10^{-4}$	$3,22 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-3}$	$1,91 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$1,91 \times 10^{-3}$
STW88N65M5	$2,74 \times 10^{-4}$	$4,2 \times 10^{-4}$	$2,45 \times 10^{-3}$	$3,29 \times 10^{-3}$	6×10^{-5}	$3,29 \times 10^{-3}$

Таблица 6. Потери на рассматриваемых транзисторах при +75 °С

Наименование	Потери коммутации P_{sw} Вт			Потери проводимости P_{con} Вт			Суммарные потери P_{total} Вт
	Diode Loss	MOSFET Loss	Total Switching Loss	Diode loss	MOSFET Loss	Total Cond. Loss	
IPW60R041C6	87,2	183,9	271,1	7,5	11,0	18,5	289,6
FCH76N60NF	16,5	178,0	194,5	7,5	8,6	16,1	210,6
IXFX80N60P3	21,8	146,2	168,0	7,0	16,0	23,0	191,0
STW88N65M5	27,4	287,0	314,4	9,0	6,0	15,0	329,4

В соответствии с таблицей 4, при одинаковых условиях включения энергия потерь IXFX80N60P3 меньше, чем у транзисторов Super Junction. При этом время нарастания тока и время спада напряжения для IXFX80N60P3 существенно лучше, чем у других транзисторов. Таким образом, новые P3 HiPerFET MOSFET превосходят большинство Super Junction MOSFET по скорости переключения и энергии потерь коммутации. Данный результат отражается также в скорости изменения тока di/dt [4].

Встроенный диод MOSFET играет большую роль при включении транзистора. Пиковый ток при включении напрямую связан со скоростью изменения тока стока и параметрами встроенного диода. Пиковый ток в тестовой схеме составляет 80 А для IXFX80N60P3, 89 А для IPW60R041C6, 79 А для FCH76N60NF и 108 А для STW88N65M5.

Частотные свойства при 100 кГц и 50% заполнении (duty cycle)

В таблице 5 приведены параметры энергии обратного восстановления, энергии включения и выключения на индуктивной нагрузке, а также потери проводимости на транзисторе и встроенном диоде при +75 °С. Значения энергий приведены в джоулях. Значения потерь проводимости посчитаны исходя из параметров, приведенных в технической

документации на устройство (V_f и $R_{ds(on)}$) при заданной температуре и величинах $I_d = 20$ А и коэффициенте заполнения импульса 50%.

Эффективность преобразования энергии главным образом зависит от потерь на коммутацию и потерь коммутации и потерь проводимости:

$$P_{total} = P_{sw} + P_{con} = (P_{off} + P_{on}) + P_{con}$$

В таблице 6 приведены итоговые значения потерь мощности с учетом потерь коммутации и потерь проводимости рассматриваемых транзисторов при +75 °С. Параметры транзистора IXFX80N60P3 выделены синим цветом. Суммарные потери на IXFX80N60P3 составят всего 192 Вт, притом что потери IPW60R041C6 в том же режиме составят 289 Вт, FCH76N60NF — 210 Вт, а STW88N65M5 — 329 Вт.

* * *

В статье приведен полный анализ преимуществ и недостатков новых P3 HiPerFET MOSFET по сравнению с Super Junction MOSFET. Анализ характеристик коммутации P3 HiPerFET MOSFET показал их преимущество по сравнению с представленными на рынке транзисторами Super Junction.

В ряде приложений, таких как управление двигателями, балласт ламп, драйверы лазер-

ных диодов, DC/DC-преобразователи, заряд аккумуляторных батарей и робототехника, с помощью транзисторов P3 HiPerFET могут быть получены существенные преимущества как по эффективности преобразования, так и по стоимости готового решения по сравнению с транзисторами Super Junction.

Самым главным ограничением эффективного применения MOSFET остается сопротивление открытого канала, которое приводит к увеличению потерь мощности и росту температуры. Новые транзисторы P3 HiPerFET MOSFET предлагают оптимальное соотношение потерь проводимости и потерь коммутации по сравнению с другими представленными на рынке продуктами [3].

Литература

1. Jayant Baliga B. Fundamental of Power Semi. Devices // Springer Science + Business Media LLC. NY. 2008.
2. Sattar A. Power MOSFET Basics. IXAN0061. IXYS Corporation. 2007.
3. Vinod Kumar Khanna. IGBT Theory and Design. John Wiley & Sons. 2003.
4. Galluzzo R., Melito M., Musumeci S. and Saggio M. A New High-Voltage Power MOSFET for Power Conversion Applications // IEEE. Stradale Primosole, 121-Catania, Italy. 2000.