

Высоковольтные модули

с низкой внутренней индуктивностью для следующего поколения чипов — nHPD²

Для того чтобы получить преимущества от использования полупроводниковых приборов на основе полупроводников с широкой запрещенной зоной (WBG), необходимо снизить суммарное значение паразитной индуктивности системы. Новая технология Hitachi, ориентированная на концепцию мощных высоковольтных модулей, называется next High Power Density Dual, или HPD². Технология предлагает не только резкое сокращение внутренней индуктивности (на 75% по сравнению с обычными модулями), но и увеличение удельной мощности по сравнению с модулями F-серии, представленными Hitachi в 2014 году. Тогда компании удалось добиться повышения удельной мощности на 20% в сравнении с аналогичными компонентами. Однако модули nHPD² обеспечивают еще более высокую плотность мощности (увеличение до 10%). Разработанная технология дополнена функцией измерения тока, которая позволяет детектировать перепад напряжения на внутренней индуктивности выводов. Хотя получить высокую точность измерения при чрезвычайно малой индуктивности модуля сложно, в данной статье предлагается новый алгоритм измерения тока с использованием внутренней индуктивности и проводится его проверка для подтверждения требуемой точности.

Дайсукэ Кавасе
(Daisuke Kawase)

daisuke.kawase.ey@hitachi.com

Масамитсу Инаба
(Masamitsu Inaba)

masamitsu.inaba.qz@hitachi.com

Кейсукэ Хориучи
(Keisuke Horiuchi)

Keisuke.horiuchi.oa@hitachi.com

Кацуаки Сайто
(Katsuaki Saito)

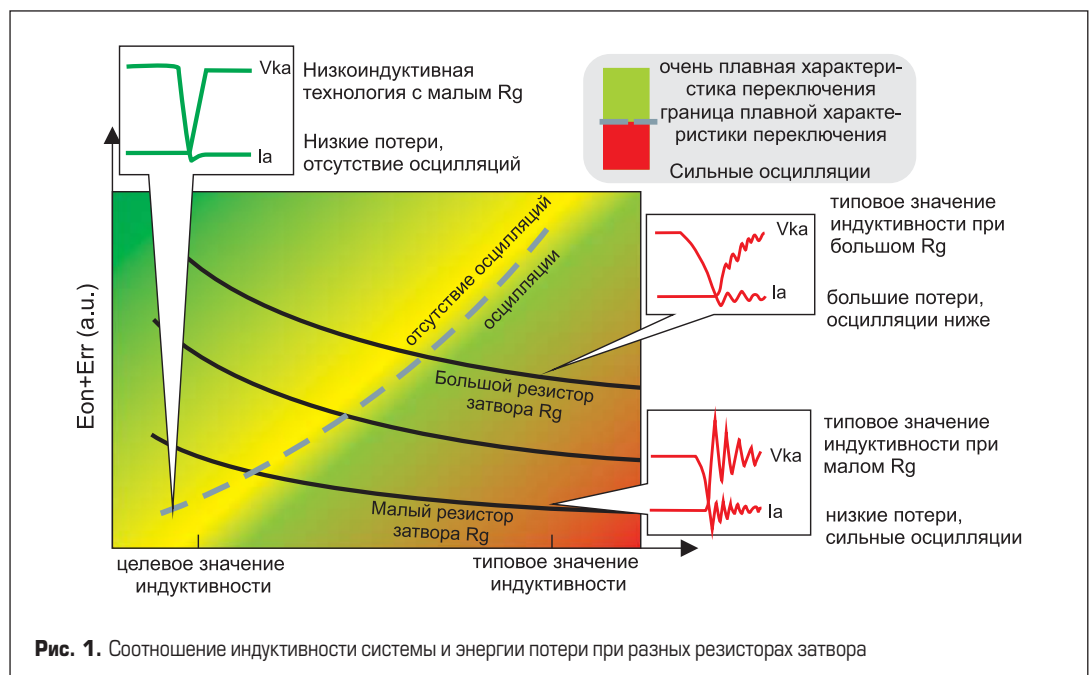
katsuaki.saito@hitachi-eu.com

Перевод:
Андрей Колпаков
Евгений Карташев

Введение

Приборы на полупроводниковых материалах с широкой запрещенной зоной предлагают очень хорошие динамические характеристики, причем не только для высокочастотных DC/DC-преобразователей, но и для инверторов электродвигателей [1]. Однако при использовании WBG-приборов в системах управления

двигателями неизбежно возникают проблемы коммутационных колебаний. Для их решения можно уменьшить скорость переключения, что, к сожалению, сводит на нет преимущества WBG-устройств. Другим, более рациональным решением является снижение индуктивности. Этот подход уже был предложен многими исследователями [2–4]. На рис. 1 показана связь между коммутационными потерями и индуктивно-



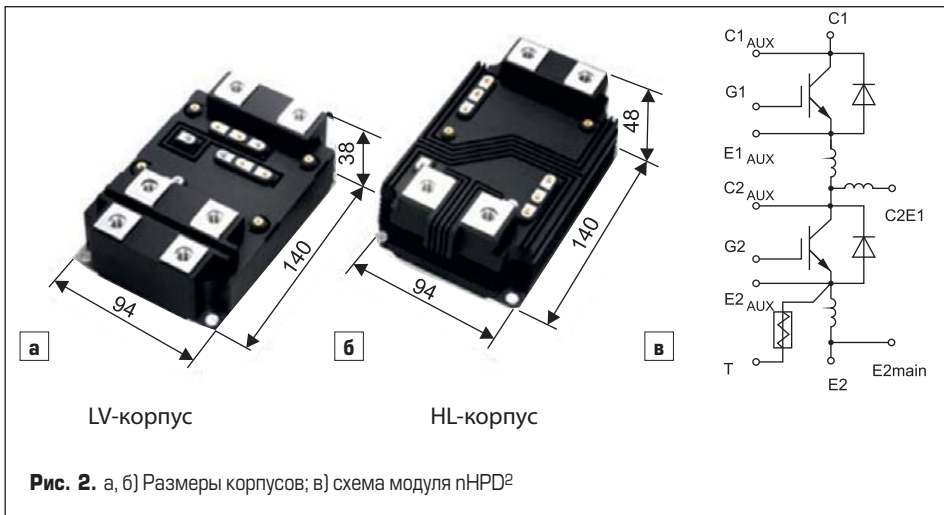


Таблица. Номинальные напряжения и токи

Корпус	$V_{ce\ cr}$, В	I_{cr} , А
LV	1200	1000
LV	1700	900
LV/HV	3300	450
HV	4500	330
HV	6500	225

Оптимизированный дизайн терминалов

Оптимизация конструкции терминалов модуля предусматривает не только уменьшенную индуктивность, но и большую стойкость к механическим воздействиям, а также повышение температуры. Для снижения индуктивности целесообразно использовать взаимную индуктивность между антипараллельными терминалами. В последнем варианте корпуса (F-версия, рис. 3б) достигнуто сокращение паразитной индуктивности примерно на 40% по сравнению с обычным типом корпуса (E-версия, рис. 3а) за счет размещения большей части площади выводов вплотную на малом расстоянии [5, 6].

Кроме того, благодаря расширению площади терминалов полумостовой цепи в новой модели nHPD² удалось обеспечить дальнейшее снижение индуктивности (рис. 3в). На рис. 4 представлено сравнение сигналов выключения обычного и nHPD²-корпусов. nHPD² демонстрирует меньшее пиковое напряжение выключения за счет низкой

стью петли. Сопротивление затвора (R_g) на рисунке представляет собой параметр, влияющий на скорость переключения. Целевое значение внутренней индуктивности определено в статье на уровне 10 нГн.

Корпус с низкой индуктивностью

Конструктив

На рис. 2 показаны габаритные размеры и соответствующая принципиальная схема. В таблице приведены номинальные напряжения и токи новых корпусов Hitachi — nHPD².

Один общий типоразмер охватывает широкий спектр применений с напряжением 1200–6500 В. На рис. 2 показаны характеристики LV- и HV-модулей для каждого уровня рабочего напряжения, напряжение изоляции составляет 6 и 10,2 кВ rms соответственно. Как видно из схемы, nHPD² содержит двойной ключ для достижения низкой внутренней индуктивности. В модуле установлен датчик тока, использующий паразитную индуктивность конструкции. В данной статье рассмотрены электрические характеристики LV-корпуса.

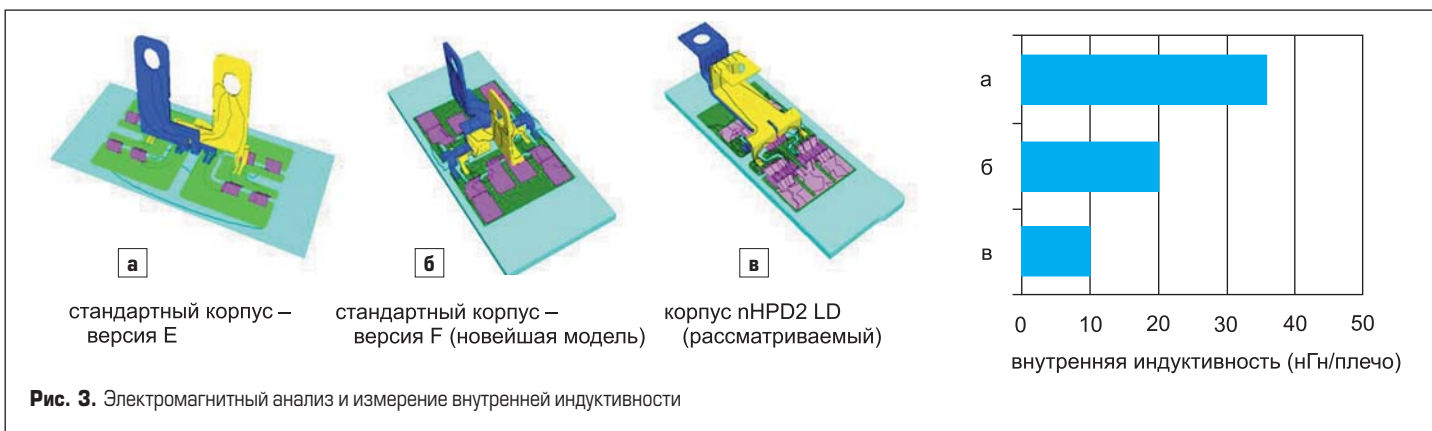


Рис. 3. Электромагнитный анализ и измерение внутренней индуктивности

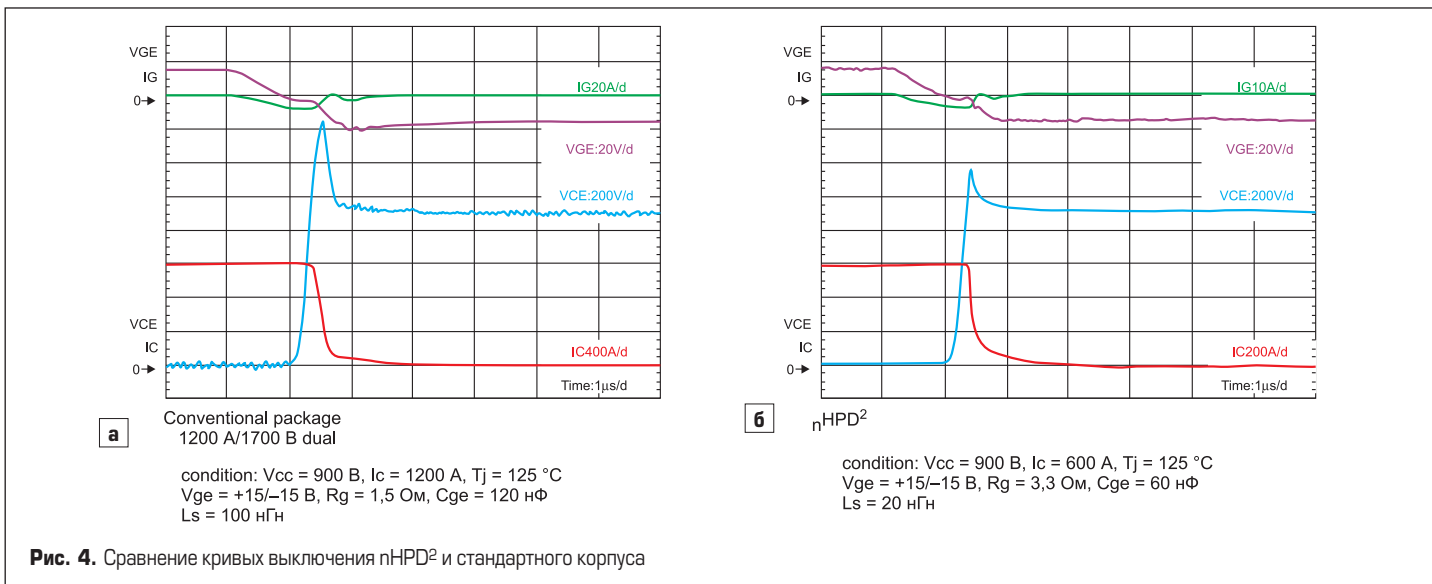


Рис. 4. Сравнение кривых выключения nHPD² и стандартного корпуса

	1 in 1 (Current)	2 in 1 (nHPD ²)
	<p>Два MBN800E33E или MBN1000E33E2 $18 \text{ нГн} \times 2 = 36 \text{ нГн}$ Два MBN1200F33F $10 \text{ нГн} \times 2 = 20 \text{ нГн}$</p>	<p>два параллельных LV корпуса $10 \text{ нГн} / 2 = 5 \text{ нГн}$ (снижение на 75%)</p>
Три фазы	<p>Конденсатор $290 \times 410 = 118,9 \text{ мм}^2$</p> <p>$1200 \text{ А} \times 6 / (290 \times 410) = 0,061 \text{ А/мм}^2$</p>	<p>Конденсатор $140 \times 564 = 78,96 \text{ мм}^2$ (снижение на 34%)</p> <p>$900 \text{ А} \times 6 / (140 \times 564) = 0,068 \text{ А/мм}^2$ (Высокая плотность мощности, улучшение 13%)</p>

Рис. 5. Топология конвертера со стандартным модулем и nHPD²

внутренней индуктивности, составляющей 9,7 нГн, что удовлетворяет целевым требованиям для WBG-модулей.

Преимущества для применения в инверторах

Концепция двойного ключа (низкая индуктивность)

Использование концепции двойного ключа — важное условие для уменьшения индуктивности каждой фазной стойки на 75%. Проводилось сравнение индуктивностей однофазных модулей nHPD². На рис. 5 (слева) показана конфигурация с двумя одиночными ключами с током 800 или 1200 А и паразитной индуктивностью в 18 нГн (или 10 нГн в последней F-версии на 1200 А). Общая индуктивность фазной стойки оценивается как 36 нГн. На рис. 5 (справа) представлена полумостовая конфигурация nHPD² с паразитной индуктивностью 10 нГн. Эквивалентная индуктивность полной фазы составляет всего 5 нГн (10 нГн/2). Это означает, что конструктив nHPD² обеспечивает резкое сокращение собственной индуктивности — на 75% по сравнению с обычным модулем. На рис. 5 также показана относительная плотность мощности, приведенная к используемой площади и номинальному току 3-фазной схемы. Эти данные подтверждают, что конструктив nHPD² способен повысить удельную мощность на 10% по сравнению с обычным модулем поколения 2014-го, в котором плотность мощности уже была увеличена на 20% [5, 6].

Параллельная работа nHPD² (повышение выходной мощности)

Расположение пары выводов Р и N на одной из коротких сторон корпуса и АС-терминала на противоположной стороне формирует модульную концепцию дизайна nHPD². Подключение к подсистемам и другим компонентам может быть упрощено при использовании отдельных шин постоянного и переменного тока. Это позволяет уменьшить

габариты инвертора за счет оптимизации соединений звена постоянного тока и нагрузки. На рис. 6 приведен пример сборки при установке двух модулей nHPD² в параллель и 3-фазной конфигурации схемы (в общей сложности 6 модулей nHPD²).

При параллельном включении необходимо рассмотреть возможный дисбаланс токов между модулями. На стороне DC-терминала конденсаторы равномерно установлены от-

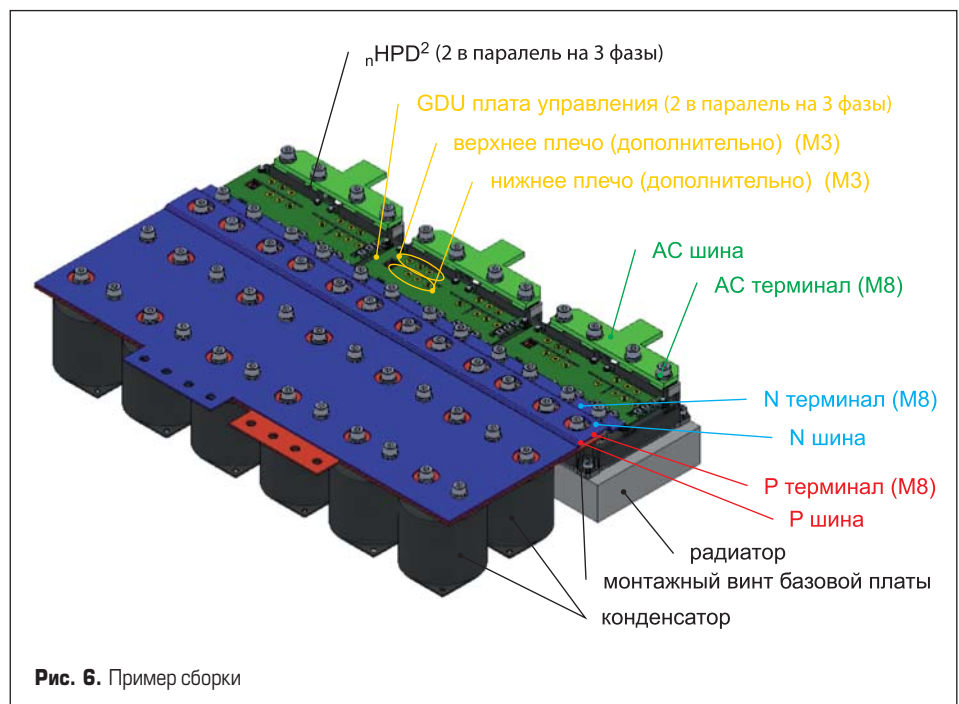


Рис. 6. Пример сборки

носителем каждого nHPD²-модуля, чтобы предотвратить возникновение дисбаланса. С другой стороны вдоль АС-вывода общая шина соединена с двумя модулями nHPD². Здесь следует анализировать индуктивность шины переменного тока, поскольку внутренняя индуктивность nHPD² относительно невелика. Особенно важно учитывать паразитную индуктивность АС-терминала, чтобы исключить вероятный дисбаланс. На рис. 7 показана эпюра тока короткого замыкания двух параллельно включенных nHPD²-модулей. Прямым следствием индуктивного баланса является хорошее распределение токов короткого замыкания и отсутствие существенных различий формы сигналов.

Функция измерения тока

Токовый датчик для низкоиндуктивного корпуса

Корпус nHPD² имеет низкую внутреннюю индуктивность, что позволяет снизить уровень колебаний при использовании WBG-полупроводников. Благодаря малой паразитной индуктивности потери включения оказываются больше, чем у обычных модулей, поскольку перепад напряжения на коммутиремом приборе растет во время включения. Такое большое увеличение потерь неприемлемо, поэтому, чтобы их компенсировать, приходится использовать меньшее сопротивление затвора (R_g) для увеличения di/dt . Однако малая величина R_g повышает скорость изменения тока di/dt сразу после короткого замыкания. Таким образом, низкая индуктивность корпуса позволяет обнаруживать ток короткого замыкания за счет прямого детектирования di/dt .

Точность детектирования di/dt в низкоиндуктивном корпусе

Технология измерения тока с использованием внутренней индуктивности корпуса

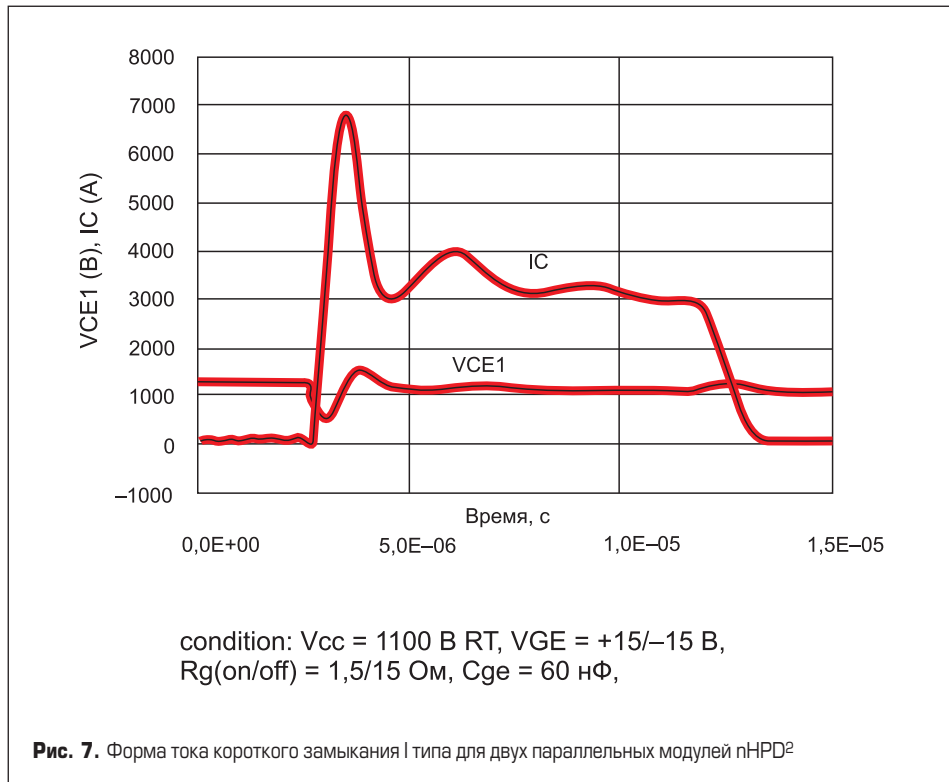


Рис. 7. Форма тока короткого замыкания I типа для двух параллельных модулей nHPD²

описана в [7]. Такой метод предполагает достаточно большую индуктивность, чтобы обеспечить высокую точность. Это противоречит требованию снижения потерь за счет использования низкоиндуктивного корпуса. В данной статье конструктив nHPD² был оснащен терминалом измерения тока, использующим внутреннюю индуктивность относительно небольшой величины. При применении стандартного алгоритма ток верхнего плеча вычисляется на основе разности потенциалов ($L_2 \times di_1/dt$) между вспомогательными выводами 6 и 4, показанными на рис. 5. В нижнем плече выводы 10 и 8 использованы для измерения разности потенциалов ($L_3 \times di_2/dt$). Для реализации низкоиндуктивного корпуса

разработаны терминалы, обеспечивающие протекание тока во встречном направлении на некоторое расстояние.

Таким образом, взаимная индуктивность между соседними терминалами не может быть проигнорирована. Здесь мы предлагаем новый алгоритм, позволяющий точно оценить ток коллектора на основе измеренного перепада напряжения (V_{6-4} и V_{10-8}), описанного в уравнении (1). Это выражение может быть преобразовано в уравнение (2), а ток в верхнем и нижнем плече — получен с помощью уравнения (3), представленного на рис. 8. Использование метода численного электромагнитного анализа позволяет определить каждую сосредоточенную константу.

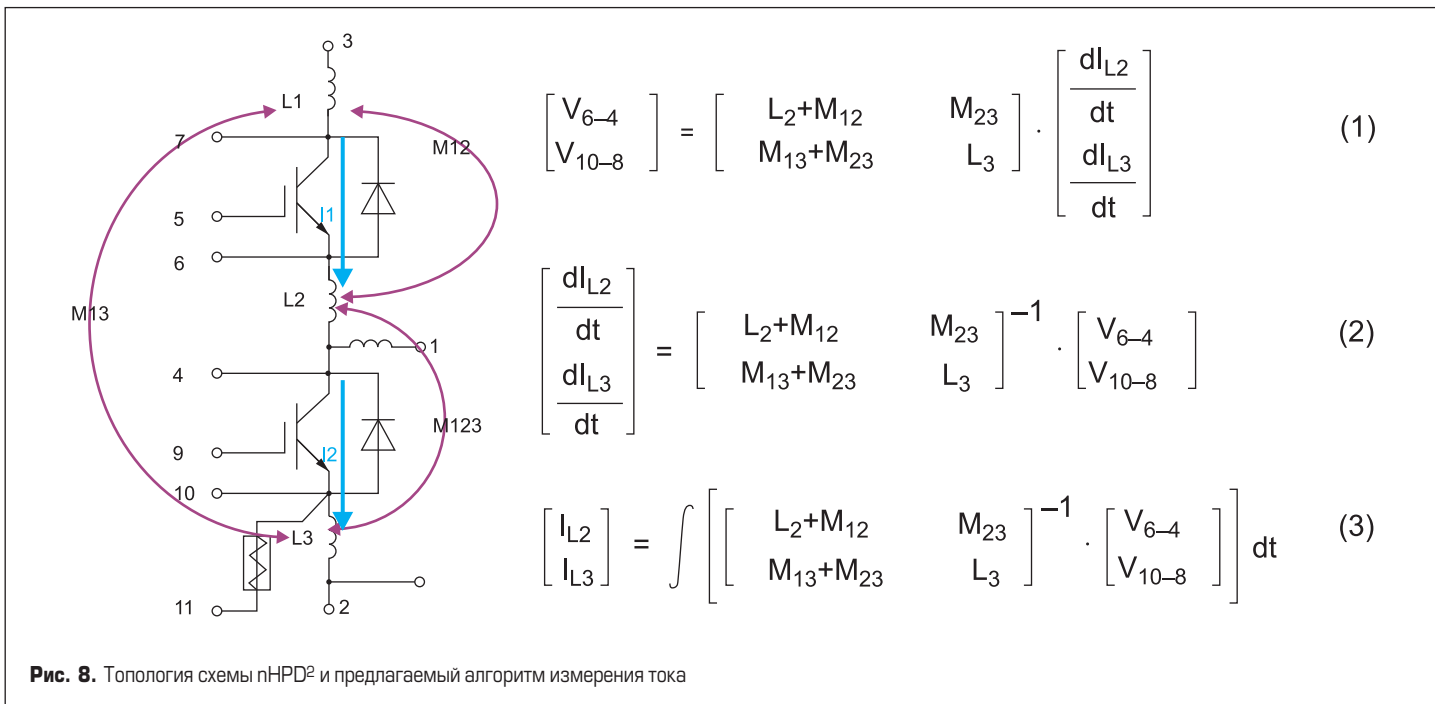
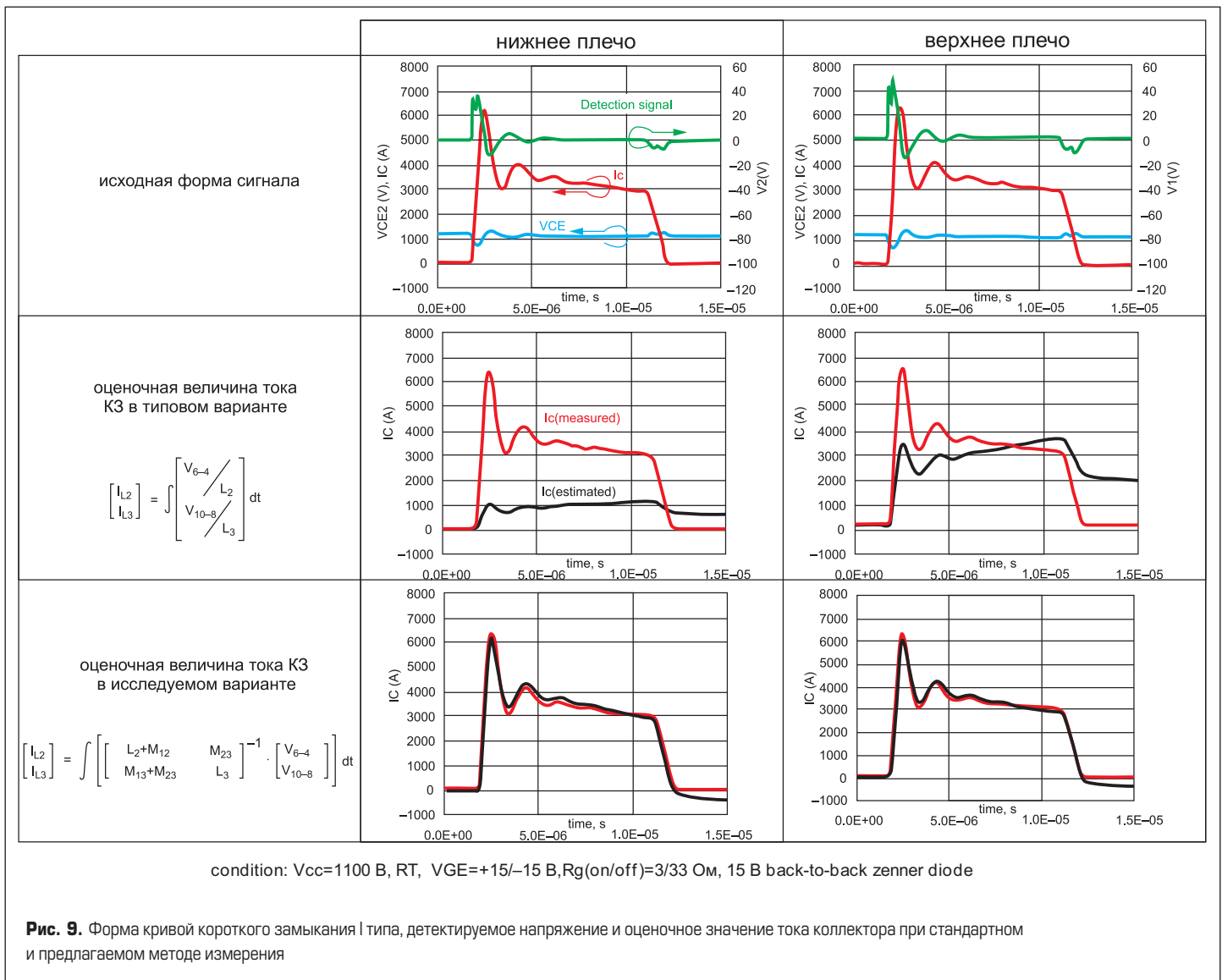


Рис. 8. Топология схемы nHPD² и предлагаемый алгоритм измерения тока



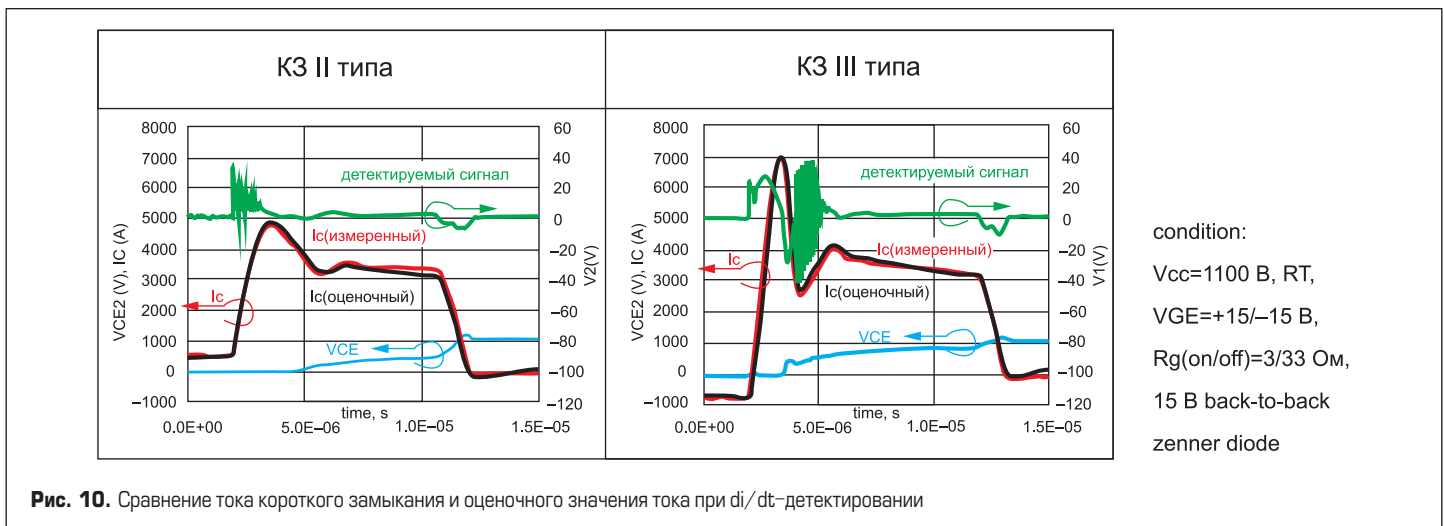
На рис. 9 показан пример экспериментальных результатов оценки величины тока. Во-первых, были сопоставлены сигналы токов короткого замыкания I типа. Значения токов, полученных по обычной методике, оказываются менее половины и более чем в два раза больше тока в нижнем и верхнем плече. Оценка тока в соответствии с предложенным алгоритмом

демонстрирует хорошее согласование с измеренными значениями.

Во-вторых, были сопоставлены сигналы токов короткого замыкания II и III типа. На рис. 10 показаны оценочные и измеренные значения токов КЗ II и III типа, полученные с помощью такого же алгоритма. Обе оценочные величины токов имеют хорошее согласование с измеренными значениями.

Закключение

Был разработан конструктив модуля с высокой плотностью мощности (nHPD²), имеющий внутреннюю индуктивность менее 10 нГн. Поскольку корпус nHPD² спроектирован для реализации двухключевой схемы, он обеспечивает кардинальное снижение паразитной индуктивности полной



фазы — на 75% относительно обычного модуля. Мы также убедились в том, что nHPD² имеет на 10% большую плотность мощности по сравнению с последним поколением модулей. Был предложен новый алгоритм, который использует паразитную индуктивность модуля и предназначен для оценки тока коллектора на основе измеренного падения напряжения. Новый метод применяет взаимную индуктивность между соседними терминалами, что обеспечивает высокую точность измерений. Прогнозируемое значение тока коллектора, полученное с помощью предложенного алгоритма, хорошо согласуется с экспериментальными результатами,

несмотря на чрезвычайно низкую индуктивность модуля.

Литература

1. Ogawa K. et al. Traction inverter that applied SiC hybrid module. PCIM, 2011.
2. Neeb C. et al. A 50 kW IGBT Power Module for Automotive Applications with Extremely Low DC-Link Inductance. EPE, 2014.
3. Borghoff G. Implementation of low inductive strip line concept for symmetric switching in a new high power module. PCIM, 2013.
4. Beckendahl P. et al. Breakthrough into third dimension — Sintered multi-layer flex for ultra-low inductance modules.
5. Kushima T. et al. 3.3kV/1800A IGBT module using advanced trench HiGT structure and module design optimization. PCIM, 2014.
6. Azuma K. 3.3kV IGBT module with low power loss and high current ratings. PCIM, 2013.
7. Oinonen M. et al. Current measurement and short-circuit protection of an IGBT based on module parasitic. EPE, 2014.
8. Andenna M. et al. The next generation high voltage IGBT modules utilizing Enhanced-Trench ET-IGBTs and Field Charge Extraction FCE-Diodes. EPE, 2014.