

# Высоковольтные RFC-диоды X-серии

## с мягкой характеристикой восстановления

**В настоящее время одним из наиболее популярных схемотехнических решений для реализации средневольтного преобразователя являются трехуровневые инверторы на IGBT-модулях со связью средней точки через диоды. Специально для таких применений компания «Мицубиси Электрик» разработала новую линейку высоковольтных диодных модулей X-серии. Рассмотрим основные особенности нового продукта, а также преимущества, которые он дает при использовании в подобной топологии.**

**Нилс Солтау**  
(Nils Soltau)

**Кенжи Хатори**  
(Kenji Hatori)

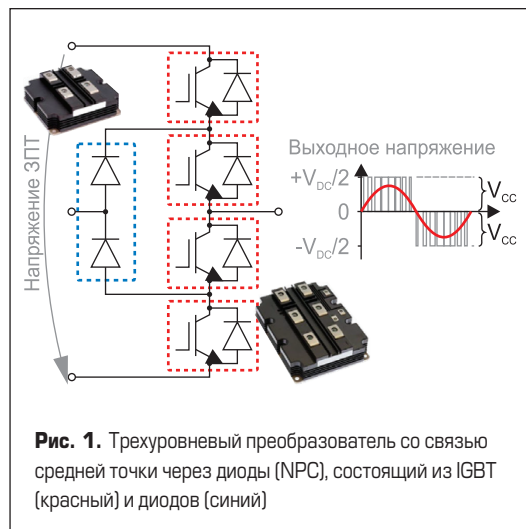
**Виктор Толстопятов**

victor.tolstopyatov@mer.mee.com

### Трехуровневые инверторы со связью средней точки через диоды

Трехуровневая топология со связью средней точки через диоды, или NPC-топология (Neutral Point Clamped), — типичное схемотехническое решение, реализуемое в средневольтных преобразователях большой мощности. Топология NPC используется в преобразователях офшорных ветрогенераторов, статических компенсаторов STATCOM, прокатных станков, конвейеров и даже тяговых приводов судов. Так что же уникального в топологии NPC?

На рис. 1 показана принципиальная схема фазы трехуровневого NPC-преобразователя. Она состоит из четырех главных IGBT (обведены красным). Для одного плеча фазы два транзистора соединяются последовательно, что обеспечивает первое преимущество NPC-конвертера — напряжение в звене постоянного тока может быть в два раза выше в сравнении с двухуровневым инвертором. Также в схеме присутствуют обратные диоды (обведены синим), благодаря которым конвертер способен выдавать три различных уровня напряжения:  $+V_{DC}/2$ ,  $0$ ,  $-V_{DC}/2$ .



**Рис. 1.** Трехуровневый преобразователь со связью средней точки через диоды (NPC), состоящий из IGBT (красный) и диодов (синий)

Дополнительный уровень выходного напряжения снижает содержание паразитных гармоник в выходной синусоиде в сравнении с двухуровневым преобразователем, что позволяет уменьшить размеры выходных фильтров и повысить КПД преобразователя.

Как видно на рис. 1, выходное напряжение изменяется скачкообразно на величину  $V_{DC}/2$ . Это дает два преимущества. Во-первых, динамически потери в IGBT ниже, так как меньше напряжение на полупроводнике  $V_{CC}$ . Во-вторых, снижается уровень токов нулевой последовательности, которые провоцируют электромагнитные помехи (ЭМП) и могут вывести из строя двигатель.

В совокупности трехуровневый NPC-преобразователь имеет следующий ряд преимуществ перед двухуровневым:

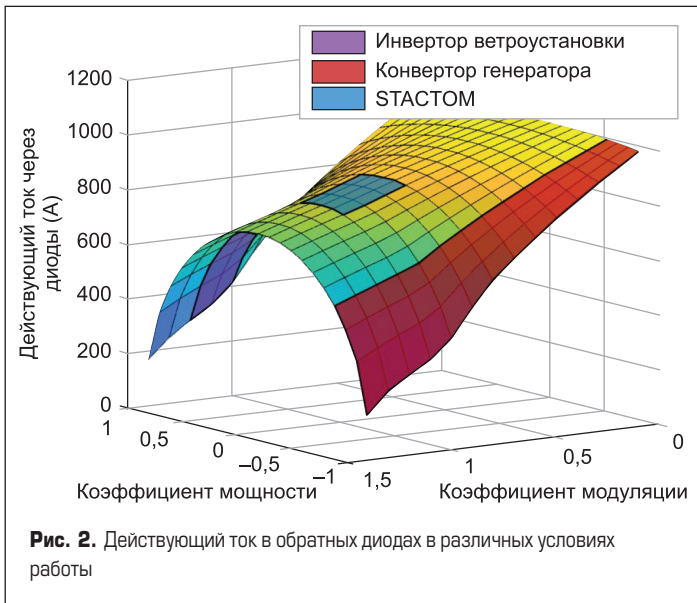
- более высокое напряжение в звене постоянного тока и выходное напряжение;
- меньшие по размеру, более эффективные выходные фильтры;
- более высокая частота переключения;
- низкие токи нулевой последовательности.

### Сфера применения

Сегодня NPC-конвертеры имеют очень широкую область использования. При этом требования к преобразователю довольно сильно разнятся в различных применениях. Рассмотрим три показательных примера.

Первый пример — сетевой инвертор офшорной ветряной турбины, передающий энергию звена постоянного тока в сеть. В таком режиме конвертер работает при значениях  $\cos(\varphi)$ , близких к 1. Преобразователь может работать напрямую на сеть либо через фильтр. Так, требуется лишь небольшое изменение коэффициента модуляции  $m$ .

Второй пример — активный преобразователь все той же офшорной ветряной турбины. Поскольку мощность передается со стороны AC (генератор) к DC (звено постоянного тока — ЗПТ), преобразователь



работает с отрицательным коэффициентом мощности. Более того, необходимо постоянное изменение коэффициента модуляции из-за нестабильности скорости вращения генератора и его напряжения.

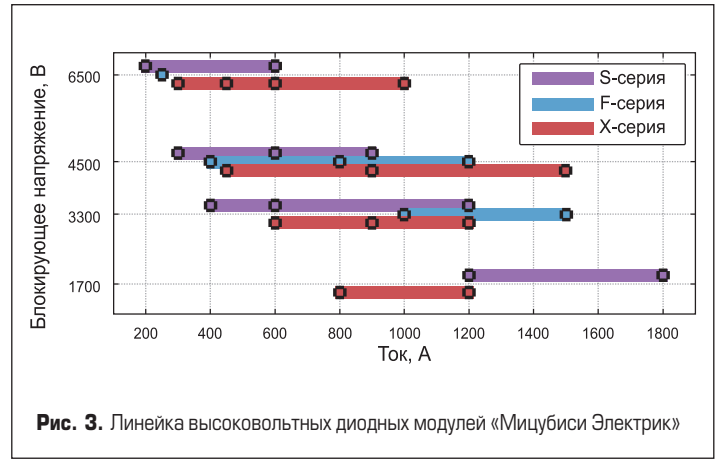
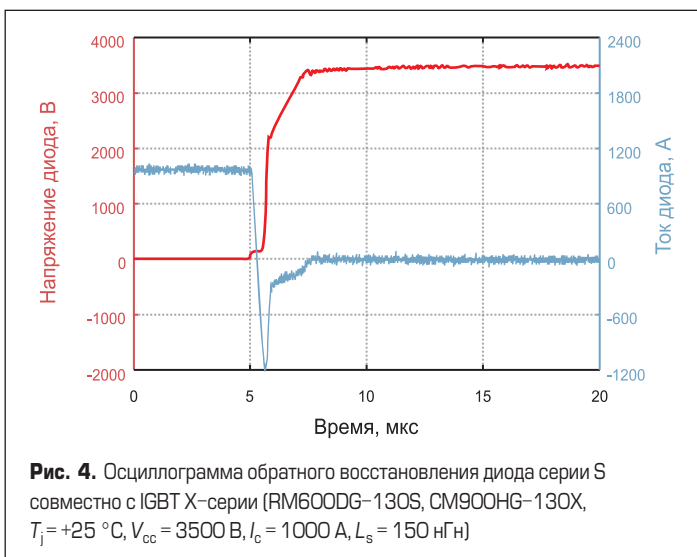
И наконец, третий пример — STATCOM, генерирующий реактивную мощность в сеть. Такой преобразователь может работать с коэффициентом мощности в районе нуля в зависимости от свойств сети. При постоянном напряжении сети коэффициент модуляции остается относительно постоянным.

Рассмотрим режимы работы обратных диодов в трехуровневой NPC-топологии для каждого из вышеописанных применений. Для примера возьмем NPC-преобразователь с напряжением в ЗПТ 5000 В, синусоидальным выходным током 1500 А (RMS), частотой переключения 600 Гц и выходной частотой 50 Гц.

На рис. 2 показана зависимость среднеквадратичного тока верхнего диода от коэффициента модуляции и коэффициента мощности. Из кривой видно, что при выходном токе инвертора 1500 А ток через обратные диоды низкий, однако при уменьшении коэффициента модуляции ток диода достигает максимальных значений. Также наивысшие значения тока удастся получить при работе с  $\cos(\varphi)$  около нуля.

Из рис. 2 можно сделать вывод, что ток обратных диодов в трехуровневой NPC-топологии сильно зависит от применения. Таким образом, номинал обратных диодов средней точки должен быть выбран тщательным образом в соответствии с текущими параметрами работы. В противном случае преобразователь не будет конкурентоспособным с точки зрения производительности или цены.

По это причине компанией «Мицубиси Электрик» была представлена широкая линейка высоковольтных IGBT- и диодных модулей.



Обзор линейки диодов в модульном исполнении показан на рис. 3. Высоковольтные диоды представлены в классах напряжения 1,7–6,5 кВ. Новейшая серия X выходит в дополнение к уже существующим сериям S и F, которые находятся в массовом производстве. Диоды серии X — это те же RFC (Relaxed Field Cathode) диоды с мягким восстановлением, которые используются в качестве антипараллельных диодов в транзисторных модулях серии X [1]. Однако применение IGBT-транзисторов серии S или F совместно с обратными диодами серии X в одном преобразователе тоже возможно. Пример такого совмещения приведен на рис. 4.

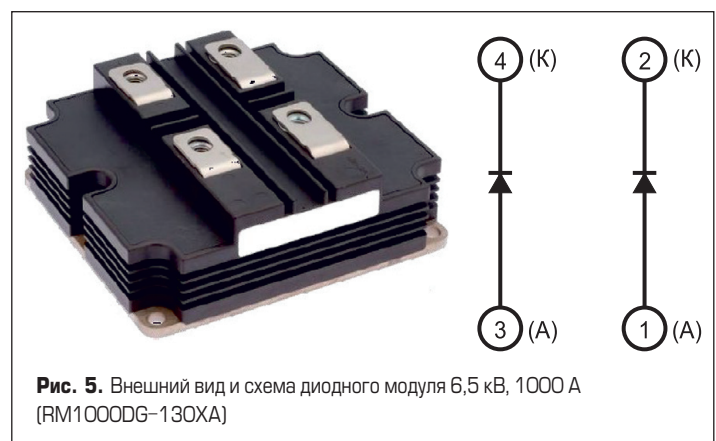
**RFC-диоды серии X с мягким восстановлением**

Компания «Мицубиси Электрик» анонсировала выпуск линейки диодных модулей на базе чипов серии X с мягкой характеристикой восстановления. Кристаллы диодов серии X уже используются в составе IGBT-модулей той же серии, где показывают высокие эксплуатационные характеристики, такие как:

- широкая область безопасной работы (RRSOA);
- мягкая [2] характеристика восстановления даже в условиях высокой индуктивности;
- высокая стойкость к ударным токам и показатель  $Pt$ ;
- высокий номинальный рабочий ток;
- низкие статические и динамические потери;
- допустимая температура  $+150^\circ\text{C}$  в рабочем режиме для всех классов напряжений.

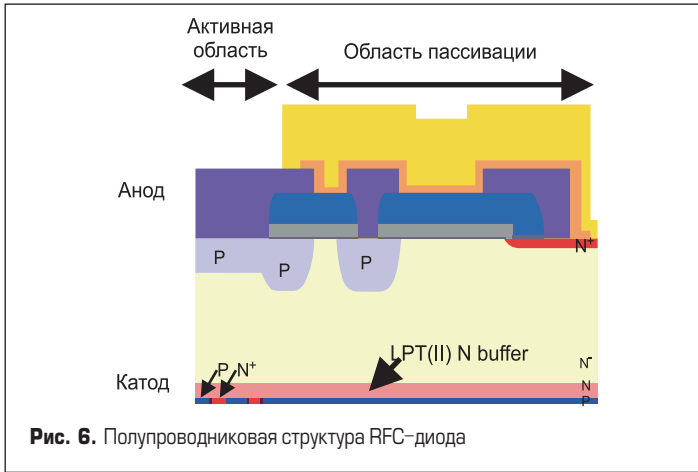
Новая линейка диодов имеет классическую для высоковольтных модулей конструкцию корпусов размерами 130×140 мм. На рис. 5 показан диодный модуль на 6,5 кВ.

Особенность RFC-диодов состоит в том, что в их структуре имеются дополнительные участки с  $p$ - и  $n+$ -проводимостью со стороны катода (рис. 6), которые смягчают процесс восстановления диода и тем самым улучшают его стойкость к повышенным нагрузкам. Также мягкое восстановление диода уменьшает уровень ЭМП. Изначально технология RFC была предложена в [3] и получала планомерные улучшения [4–6].

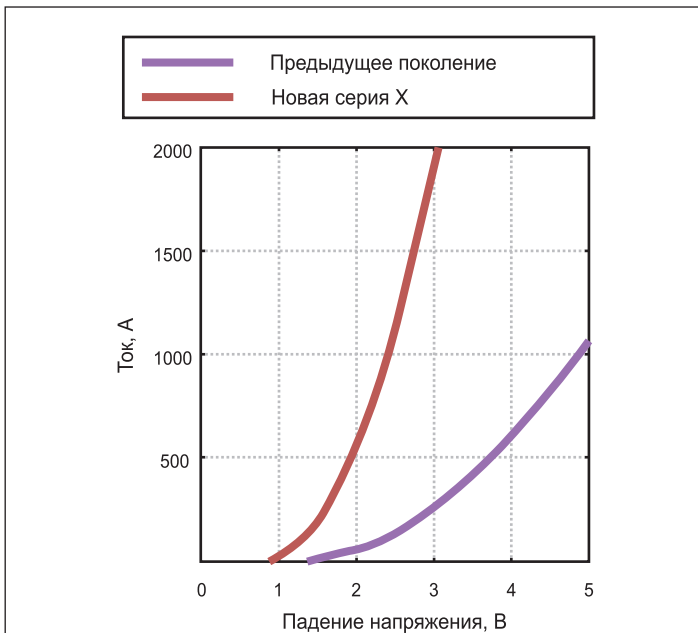


**Таблица.** Способность диодов X-серии противостоять сверхтокам по сравнению с предыдущей серией

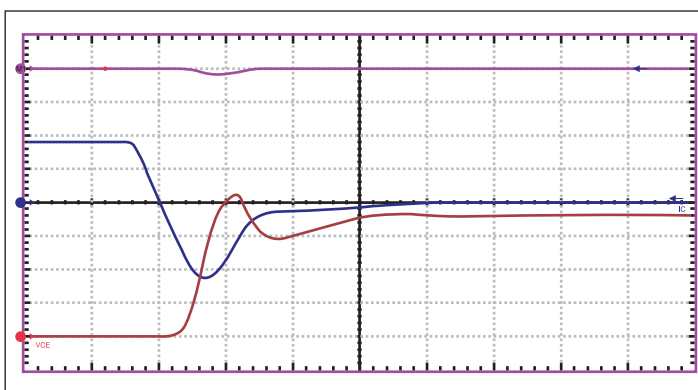
Параметры	Предыдущее поколение	Новая X-серия	Отличие
Номинал	4500 В, 900 А		
Условия	$T_{jstart} = +25\text{ }^\circ\text{C}$ , 60 Гц, полусинус	$T_{jstart} = +150\text{ }^\circ\text{C}$ , 50 Гц, полусинус	
Импульсный ток	6400 А	8800 А	+38%
$I^2t$	170 кА <sup>2</sup> с	390 кА <sup>2</sup> с	+129%



**Рис. 6.** Полупроводниковая структура RFC-диода



**Рис. 7.** Сравнение падения напряжения в 6,5-кВ чипе серии X (RM1000DG-130XA) с предыдущим поколением при  $T_j = +25\text{ }^\circ\text{C}$



**Рис. 8.** Осциллограмма восстановления 3,3-кВ диода X-серии в условиях высокой индуктивности ( $I_c = 1800\text{ А}$ ,  $V_{cc} = 1800\text{ В}$ ,  $T_j = +25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $L_s = 300\text{ нГн}$ ) — 1 мкс/дел, 500 В/дел (красный луч), 1000 А/дел (синий луч)

На рис. 7 видно падение напряжения на диодах для модулей 6500 В в двух различных сериях. Фиолетовая линия показывает зависимость для 600-А модуля предыдущего поколения, красная — 1000-А модуль серии X. Видно, что падение напряжения на диоде, а следовательно, и статические потери были существенно снижены. Это позволит увеличить номинальную мощность преобразователя, повысить КПД, улучшить массогабаритные показатели.

Помимо сниженных статических потерь, была также увеличена стойкость диодов серии X к сверхтокам, которая определяется характеристикой  $I^2t$ . Суть данного теста заключается в том, что через диод пропускается полуволна синусоидального тока, имеющая амплитудное значение, существенно превышающее его номинальный ток. При этом в описании на диод обычно приводится пиковое значение либо интеграл квадрата тока. Способность диода противостоять сверхтокам необходима в случае возникновения короткого замыкания в преобразователе.

Сравнение максимального пикового тока RFC-диодов серии X на 4500 В с предыдущими сериями демонстрирует существенное улучшение данных характеристик. Так, показатели пикового импульсного тока и  $I^2t$  выросли на 38% и 129% соответственно (таблица).

Данные характеристики особенно важны в многоуровневых топологиях, где паразитная индуктивность звена постоянного тока задумано больше из-за сложной конструкции соединительных шин. На рис. 8 приведена осциллограмма процесса восстановления диода X-серии на 3,3 кВ при индуктивности 300 нГн. Даже в таких жестких условиях диод серии X показывает предсказуемую и плавную характеристику восстановления. В конечном счете высокая стойкость полупроводников к большим нагрузкам увеличивает надежность преобразователя в целом и ускоряет процесс разработки.

**Заключение**

Компания «Мицубиси Электрик» выпустила на рынок новую серию высоковольтных модульных диодов, полностью совместимую с уже зарекомендовавшими себя предыдущими S- и F-сериями. Благодаря широкой линейке наиболее подходящие диодные модули могут быть подобраны для различных применений: будь то многоуровневый преобразователь или DC-чоппер. Использование в диодах серии X новейшей технологии RFC позволило снизить потери, увеличить номиналы модулей, а также повысить стойкость в критических режимах работы за счет улучшения характеристик пикового тока и  $I^2t$ .

**Литература**

1. Танака Н., Толстопятов В. Новая серия высоковольтных IGBT-модулей с улучшенными параметрами надежности // Силовая электроника. 2016. № 5.
2. Nakamura K., Iwanaga H., Okabe H., Saito S., Hatade K. Evaluation of oscillatory phenomena in reverse operation for High Voltage Diodes. 21<sup>st</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, Barcelona, 2009.
3. Nakamura K., Masuoka F., Nishii A., Sadamatsu K., Kitajima S., Hatade K. Advanced RFC technology with new cathode structure of field limiting rings for High Voltage planar diode. 22<sup>nd</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD). Hiroshima, 2010.
4. Nakamura K., Nishii A., Masuoka F., Terashima T. Relaxation of current filament due to RFC technology and ballast resistor for robust FWD operation. 23<sup>rd</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. San Diego, 2011.
5. Masuoka F., Nakamura K., Nishii A., Terashima T. Great impact of RFC technology on fast recovery diode towards 600 V for low loss and high dynamic ruggedness. 24<sup>th</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. Bruges, 2012.
6. Masuoka F., Tanaka K., Kachi T., Yoshiura Y., Shimizu K. RFC diode with high avalanche stability and UIS capability. 29<sup>th</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD). Sapporo, 2017.
7. Nakamura K., Shimizu K. Advanced RFC diode utilizing a novel vertical structure for soilness and high dynamic ruggedness. 29<sup>th</sup> International Symposium on Power. 2017.