

Перспективы использования диодов с резким восстановлением в силовой электронике

Василий Боровиков, Юрий Красников, Иван Красников (siel@ngs.ru)

В статье на примере импульсного понижающего регулятора напряжения показано, что замена быстродействующего кремниевого диода с мягким восстановлением на аналогичный диод с резким восстановлением совместно с разработанным снаббером тока позволяет уменьшить динамические потери при замыкании ключа более чем на порядок. Приводятся аргументы в пользу разработки и промышленного освоения быстродействующих кремниевых диодов с резким восстановлением для преобразователей с повышенными КПД и надёжностью.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в развитых странах мира более половины получаемой электроэнергии проходит через полупроводниковые преобразователи, что обеспечивает рациональное и экономное её потребление. Уровень развития силовой электроники определяет эффективность генерации и исполь-

зования электроэнергии в энергетике, промышленности, бытовом секторе и во многом определяет уровень жизни населения и обороноспособность страны. Поэтому такие направления, как энергоэффективность, базовые технологии силовой электротехники, технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии, технологии создания электронной компонентной базы, входят в перечень приоритетных и критических направлений развития науки, технологий и техники в РФ.

Одна из основных проблем в силовой электронике – проблема восстановления обратного сопротивления быстродействующего кремниевого диода (БКД), когда к проводящему прямой ток диоду быстро прикладывается обратное напряжение. От того, как решена эта проблема, определяющим образом зависят КПД и надёжность преобразующего устройства в целом, т.к. при выводе накопленного в БКД заряда возникают токовые перегрузки, перенапряжения и дополнительные динамические потери в ключах и диодах. Несмотря на значительный прогресс в развитии БКД, диод по-прежнему рассматривается многими разработчиками преобразовательной техники как «слабый» элемент, ограничивающий возможность увеличить рабочую частоту, КПД и надёжность преобразователей, работающих в режиме «жёстких» переключений (например, частота коммутации силовых IGBT-ключей в тяговом приводе электровоза составляет всего 500 Гц).

Параметры отечественных серийно выпускаемых БКД уступают лучшим

образцам зарубежных производителей. Поэтому задача по разработке БКД, имеющих более низкие прямые и динамические потери по сравнению с лучшими зарубежными аналогами, актуальна с точки зрения импортозамещения. В настоящее время развитие БКД идёт по пути совершенствования технологии изготовления кремниевых диодных структур с целью одновременного получения малого прямого напряжения, малого заряда обратного восстановления, мягкого характера обратного восстановления и надёжной работы при высоких dI/dt , dU/dt . Для этого подбирается профиль диффузионных слоёв диодной структуры, формируется неоднородный аксиальный профиль распределения времени жизни неосновных носителей путём протонного и/или электронного облучения (Control Axial Lifetime technology), а также путём комбинированной диффузии золота и платины, снижается эффективность эмиттера за счёт сложной мозаичной конструкции эмиттера.

За мягкий характер восстановления БКД приходится платить увеличенными прямыми потерями и динамическими потерями на фронте спада обратного тока, которые невозможно убрать полностью даже с использованием снаббера тока. Отметим, что БКД с мягким восстановлением разработаны специально для бесснабберного применения, при этом динамические потери в силовом ключе во много раз превышают потери в БКД.

Применение известных простых снабберных цепей, включённых последовательно с БКД D1 (см. рис. 1а, б), уменьшает потери в ключе и диоде, но при этом возникают дополнительные потери в самих снабберных цепях.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО СНАББЕРА ТОКА

В ООО «Силовая электроника» разработан новый высокоэффективный снаббер тока. Введение дополнительной обмотки W_{aux} с током подмагничивания I (как правило, это один виток с током, равным среднему току

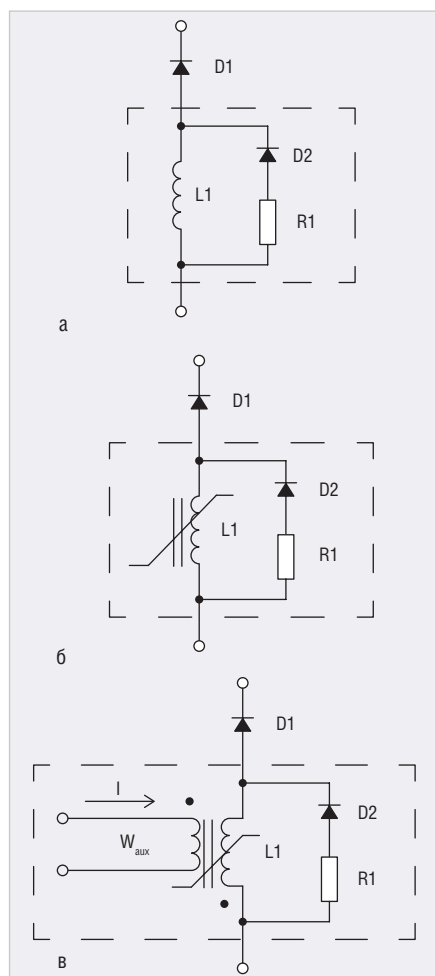


Рис. 1. Снабберы тока: а) с линейным дросселем; б) с дросселем насыщения; в) с ограничением обратного тока

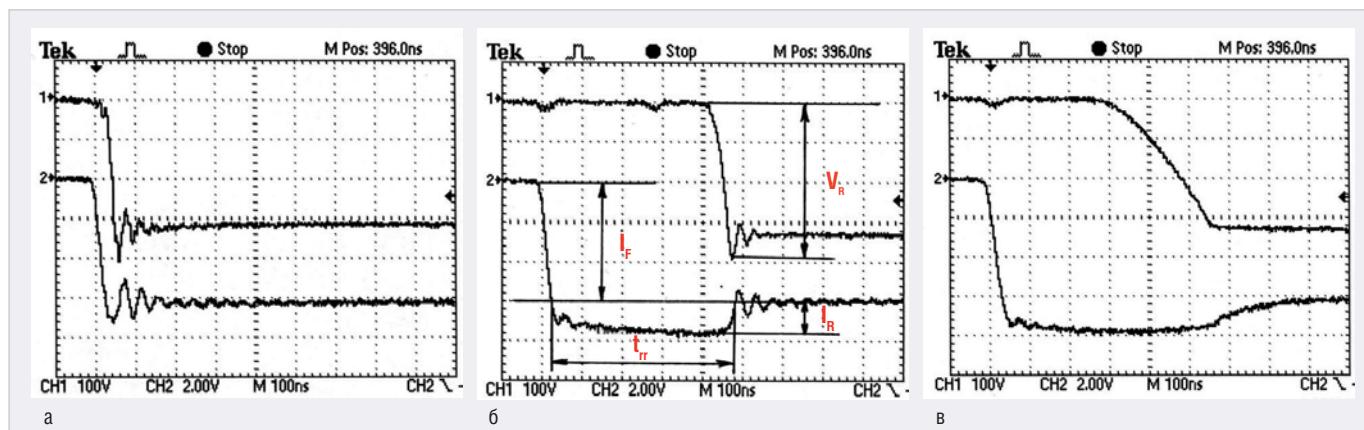


Рис. 2. Осциллограммы напряжения (канал 1, 100 В/дел.) и тока (канал 2, 10 А/дел.) при восстановлении запирающих свойств: а) карбид-кремниевый диод Шоттки CSD20060; б) диода с резким восстановлением КД2997; в) ультрабыстрого диода TURBOSWITCH с мягким восстановлением STTA2512P

нагрузки) на дросселе насыщения L1 (см. рис. 1в) приводит к радикальному изменению процесса обратного восстановления диода D1. При прикладывании обратного напряжения к цепи D1–L1 дроссель насыщения L1 выходит из насыщения и становится трансформатором тока, поэтому обратный ток диода D1 равен току подмагничивания I, делённому на отношение обмоток трансформатора тока. Сразу после запирающего диода D1 этот ток замыкается по цепи R1–D2, что приводит к обратному перемагничиванию сердечника дросселя L1 вплоть до насыщения. Подробно работа снаббера тока с ограничением обратного тока диода (тиристора) рассмотрена в [1–6].

Отметим основные преимущества предлагаемого снаббера тока:

- обратный ток постоянен по величине и может быть выбран в диапазоне 5–100% от тока подмагничивания;
- габаритные размеры, стоимость и потери в сердечнике уменьшены в несколько раз по сравнению с прототипом, представленным на рисунке 1б;
- потери в резисторе R1 (см. рис. 1в) уменьшены более чем на порядок по сравнению с прототипом;
- сразу после восстановления диода D1 сердечник дросселя насыщения L1 начинает перемагничиваться обратно вплоть до насыщения.

Использование снаббера тока с ограничением обратного тока при восстановлении БКД открывает возможность с успехом использовать БКД с резким (snappy) характером восстановления в режимах «жёсткой» коммутации силовых ключей. При выводе из БКД накопленного заряда всё напряжение

прикладывается к дросселю насыщения, поэтому в диоде и силовом ключе в этот момент нет динамических потерь, а ключ можно замыкать максимально быстро. При восстановлении запирающих свойств БКД, во-первых, не возникает резкого фронта обратного напряжения из-за медленного контролируемого вывода накопленного заряда, во-вторых, не возникает высокочастотных колебаний напряжения на запертом БКД благодаря огромной индуктивности дросселя в ненасыщенном состоянии, к тому же шунтированной R1–D2-цепью. В результате по статическим и динамическим потерям такой БКД в паре с предлагаемым снаббером тока близок к SiC-диоду Шоттки, но дешевле и надёжнее.

На рисунке 2 приведены осциллограммы тока диода и напряжения на диоде в режиме обратного восстановления с использованием предлагаемого снаббера тока для различных типов диодов при одинаковых условиях коммутации: прямой ток диода 30 А, коммутируемое напряжение 300 В.

Отметим, что у карбид-кремниевый диод CSD20060 нет накопленного заряда и, несмотря на очень быстрое выключение ($dI/dt > 1000$ А/мкс), нет больших перенапряжений на запертом диоде. В случае БКД с резким восстановлением КД2997 практически весь заряд выводится при нулевом напряжении на диоде, а динамические потери в диоде на фронте нарастания обратного напряжения не превышают 2 Вт на частоте 20 кГц при коммутируемой мощности 9 кВт. Для ультрабыстрого диода с мягким восстановлением TURBOSWITCH STTA2512P напряжение на диоде начинает нарастать, ког-

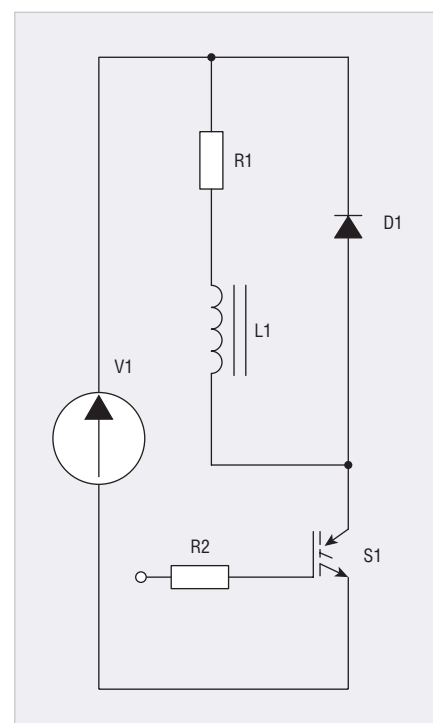


Рис. 3. Схема импульсного регулятора напряжения понижающего типа

да только часть накопленного заряда выведена из p-n-перехода, поэтому динамические потери в 4,5...5 раз больше, чем у диода КД2997.

На примере импульсного регулятора напряжения (см. рис. 3) оценим, какой выигрыш в суммарных динамических потерях в силовом ключе и диоде при замыкании ключа даст замена БКД с мягким восстановлением на БКД с резким восстановлением в паре с предлагаемым снаббером тока.

С целью упрощения оценки энергии потерь при восстановлении диода D1 с мягким восстановлением (см. рис. 4) сделаем следующие замечания и допущения:

- сумма падения напряжения на диоде D1 и ключе S1 равна U_0 ;

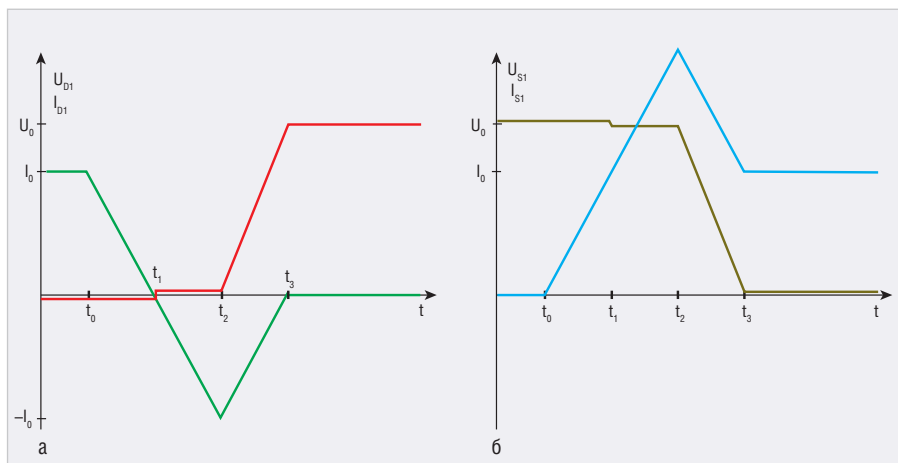


Рис. 4. Упрощённые осциллограммы тока и напряжения во время обратного восстановления диода D1: а) диод D1; б) силовой ключ S1

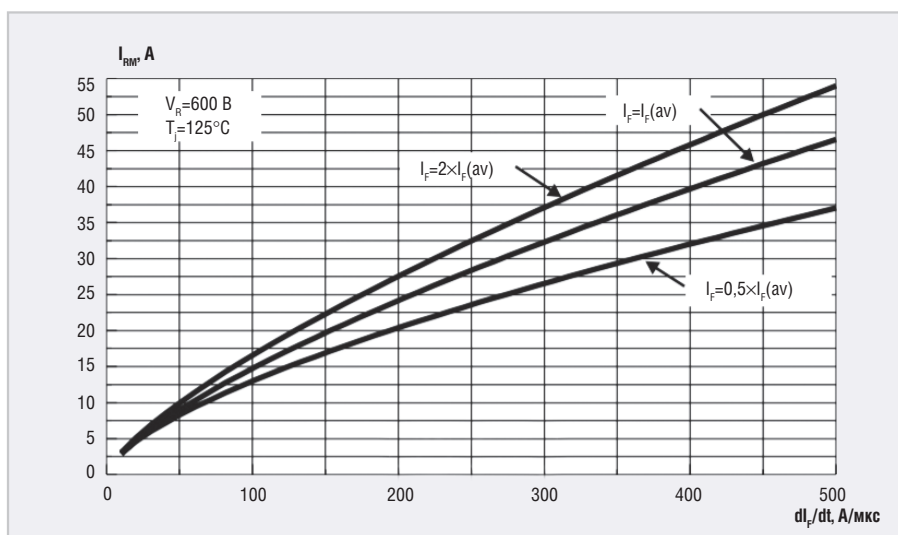


Рис. 5. Зависимость амплитуды обратного тока диода STTA2512P от di/dt

- резистор R2 подобран таким образом, чтобы амплитуда обратного тока I_{rr} диода D1 была равна прямому току I_0 ;
- коэффициент мягкости диода D1 равен 1: $K=(t_3-t_2)/(t_2-t_1)=1$.

При таких допущениях $t_1-t_0=t_2-t_1=t_3-t_2=\tau_0$, поэтому энергия потерь E_0 равна:

$$E_0=2U_0I_0\tau_0+\frac{5}{6}U_0I_0\tau_0+\frac{1}{6}U_0I_0\tau_0=2U_0I_0\tau_0+Q_0U_0=3U_0I_0\tau_0, \quad (1)$$

где $2U_0I_0\tau_0$ – потери в силовом ключе S1, связанные с током нагрузки; $\frac{5}{6}U_0I_0\tau_0$ – потери в силовом ключе S1, связанные с обратным током диода D1; $\frac{1}{6}U_0I_0\tau_0$ – потери в диоде D1 на фронте нарастания обратного напряжения; Q_0U_0 – суммарные потери в силовом ключе S1 и диоде D1, связанные с выводом накопленного заряда Q_0 .

Из рисунка 4 видно, что потери в силовом ключе S1 в 17 раз больше, чем в диоде D1. Наличие «хвоста» обратного

тока и перенапряжения на диоде D1 в момент его восстановления уменьшают эту разницу, но потери в силовом ключе всё равно примерно на порядок больше потерь в диоде. При уменьшении di/dt вдвое в рамках предложенной модели получим: $t_1-t_0=2\tau_0$, $t_2-t_1=t_3-t_2=\sqrt{2}\tau_0$, $I_{rr}=I_0/\sqrt{2}$, а энергия потерь E_1 будет равна:

$$E_1=(1+\frac{3}{\sqrt{2}})U_0I_0\tau_0+\frac{5}{6}U_0I_0\tau_0+\frac{1}{6}U_0I_0\tau_0=(1+\frac{3}{\sqrt{2}})U_0I_0\tau_0+Q_0U_0=(2+\frac{3}{\sqrt{2}})U_0I_0\tau_0. \quad (2)$$

Сравнивая E_0 и E_1 , отметим, что при уменьшении di/dt полные потери увеличиваются (даже с учётом того, что накопленный заряд уменьшается при уменьшении di/dt), причём за счёт увеличения потерь в силовом ключе S1, поэтому усилия разработчиков современных БКД направлены на создание диодов, надёжно работающих при высоких значениях di/dt, имеющих коэффициент мягкости $K \geq 10$ и уменьшенный накопленный заряд Q_0 [7].

Другой путь снижения полной энергии потерь в момент восстановления диода D1 – включение снаббера тока последовательно с диодом D1, что позволяет использовать максимально быстрое включение силового ключа S1 и максимально быстрый фронт обратного восстановления диода (т.е. $K \ll 1$).

Оценим суммарную энергию потерь E_2 в силовом ключе S1 и диоде D1 при замене диода D1 с мягким восстановлением (см. рис. 3) на диод с резким восстановлением в паре с предлагаемым снаббером тока (см. рис. 1в), причём дополнительная обмотка W_{aux} включена последовательно с основным дросселем L1 (см. рис. 3). Для этого используем реальную осциллограмму, представленную на рисунке 2б:

$$E_2=\frac{1}{2}U_0I_0\tau_1+(U_{S1}+U_{D1})Q_1+\frac{1}{2K_{tr}}U_0I_0\tau_2=\frac{1}{2}U_0I_0(\tau_1+\frac{\tau_2}{K_{tr}})+(U_{S1}+U_{D1})Q_1, \quad (3)$$

где τ_1 – время нарастания тока в силовом ключе S1; U_{S1} – падение напряжения на замкнутом ключе S1; U_{D1} – падение напряжения на диоде D1; Q_1 – накопленный заряд в диоде D1, выведенный при почти нулевом напряжении на диоде D1 и силовом ключе S1; τ_2 – время нарастания напряжения на диоде D1; K_{tr} – коэффициент трансформации дросселя насыщения L1 (см. рис. 1в).

Отметим, что отношение $(U_{S1}+U_{D1})Q_1/QU_0 \approx 0,01$, поэтому слагаемым $(U_{S1}+U_{D1})Q_1$ в формуле (2) можно пренебречь.

Оценим отношение E_0/E_2 :

$$E_0/E_2=3U_0I_0\tau_0/\frac{1}{2}U_0I_0(\tau_1+\frac{\tau_2}{K_{tr}})=6\tau_0/(\tau_1+\frac{\tau_2}{K_{tr}}). \quad (4)$$

Величину τ_0 определим исходя из условий: $I_0=30$ А, амплитуда обратного тока $I=30$ А. По графику из технических характеристик на диод STTA2512P (см. рис. 5) получаем di/dt=300 А/мкс, т.е. $\tau_0=100$ нс. Примем $\tau_1=30$ нс, $\tau_2=50$ нс, $K_{tr}=5$. Итого получаем $E_0/E_1=15$, т.е. полные динамические потери на включение силового ключа S1 (см. рис. 3) уменьшены более чем на порядок.

Выигрыш в надёжности при замене БКД с мягким восстановлением на БКД с резким восстановлением в паре с предлагаемым снаббером тока ещё значительнее.

Одна из основных причин выхода из строя БКД и силовых ключей

при беснаберном восстановлении БКД в режиме «жёсткой» коммутации – увеличение амплитуды обратного тока и динамических потерь из-за роста накопленного заряда с увеличением температуры кристалла диода (накопленный заряд увеличивается в 2–4 раза при нагреве кристалла БКД на 100°C). В результате возникает положительная зависимость динамических потерь от температуры: чем выше температура, тем больше динамические потери. Из рисунка 6 видно, что амплитуда обратного тока диода достигает 65 А (при комнатной температуре), а ток в силовом ключе – 95 А. При увеличении температуры кристалла силового ключа на 100°C амплитуда тока может вырасти до 150 А и более, что может привести к выходу силового ключа, рассчитанного на ток 40–50 А, из насыщенного режима в линейный режим работы с последующим выходом из строя.

При использовании предлагаемого снаббера тока и БКД с резким восстановлением с увеличением температуры кристалла БКД будет увеличиваться время t_{rr} протекания обратного тока (см. рис. 2б) при почти нулевом напряжении на диоде и силовом ключе, т.е. динамические потери в диоде и ключе практически не увеличиваются с увеличением температуры кристалла БКД. Обратный ток диода будет оставаться практически постоянным в течение всего времени восстановления диода. Такое решение существенно повышает КПД и надёжность преобразователя в целом.

Требования к БКД с резким восстановлением невысокие: он должен иметь малое прямое падение напряжения и малый накопленный заряд. К нему не предъявляются требования высокой динамической стойкости, как к БКД с мягким восстановлением, поэтому технология изготовления диодов с резким восстановлением может быть существенно проще, а стоимость – значительно ниже, чем для БКД с мягким восстановлением и карбид-кремниевых диодов Шоттки.

Выводы

Прежде всего, стоит отметить, что в настоящее время сложилась парадоксальная ситуация: разработчик преобразовательной техники, применяя снабберы тока и напряжения для увеличения КПД и надёжности, вынужден использовать диоды с мягким вос-

становлением, которые разработаны специально для беснаберного режима работы! Применение разработанного ООО «Силовая электроника» снаббера совместно с БКД с резким восстановлением позволит исправить эту ситуацию.

Предлагаемый снаббер тока является лучшим из известных аналогов по совокупности параметров: габариты, стоимость, форма и амплитуда обратного тока диода (тиристора), КПД, простота и удобство использования.

Использование БКД с резким восстановлением (БКДРВ) совместно с предлагаемым снаббером тока позволит радикально повысить КПД и надёжность преобразователей электроэнергии, работающих в экстремальных температурных условиях (нефтяные погружные насосы, электротранспорт, военная техника, космические объекты и т.д.) или при повышенных напряжениях, когда используются силовые ключи и диоды обладают низким быстродействием (РЖД, энергетика, промышленность).

Ввиду полного отсутствия БКДРВ на рынке необходимо провести НИР, ОКР и освоить промышленное производство нового перспективного типа диодов, которые нельзя использовать всегда и везде, а необходимо рассматривать как диоды для спецприменения, требующие специальных схемотехнических решений.

Разработка снаббера с ограничением обратного тока при восстановлении БКД (или тиристора), исследование характеристик обратного восстановления диодов различных типов с использованием разработанного снаббера тока, схемотехнические решения применения снаббера тока в различных преобразовательных устройствах были выполнены в основном за счёт сил и средств ООО «Силовая электроника». Для реализации следующих этапов (разработка новых типов БКДРВ, создание инженерного расчёта элементов снаббера тока, развитие схемотехники преобразователей электроэнергии с использованием БКДРВ) необходима государственная поддержка данного направления, нацеленного на импортозамещение и технологическую независимость России, которое может стать новой точкой роста в силовой электронике [8], причём сей-

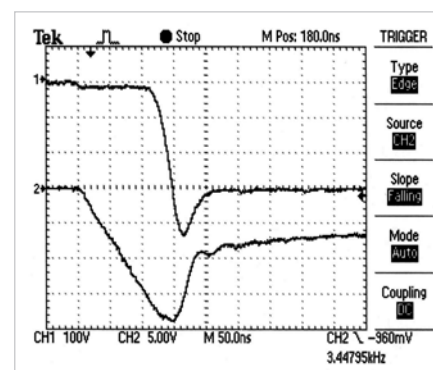


Рис. 6. Оциллограммы напряжения на диоде (канал 1, 100 В/дел.) и тока диода (канал 2, 25 А/дел.) при восстановлении запирающих свойств диода STTA2512P при $di/dt=750$ А/мкс

час в этом направлении Россия имеет абсолютный приоритет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков В.М., Красников Ю.И. Способ ограничения обратного тока при восстановлении диода. Патент RU 2256283, опубликован 10.07.2005. Бюл. № 19.
2. Боровиков В.М., Красников Ю.И. Способ ограничения обратного тока при восстановлении диода. Международная заявка на изобретение WO 2005/074114 A1, опубликована 11.08.2005.
3. Красников Ю.И., Красников И.Ю. Новые решения старых проблем в импульсных регуляторах напряжения. VIII Международный симпозиум «Электротехника 2010», доклад 5-08, Московская область, 24–26 мая 2005 г.
4. Yu. Krasnikov. New solutions to the old problems of buck and boost converters. 11th European Conference on Power Electronics and Applications, 11–14 September 2005, Dresden, Germany.
5. Боровиков В., Красников Ю. Поиск «идеальных» решений в силовой электронике: от постановки задачи до реализации проекта. Современная электроника. 2006. № 8.
6. Yuriy I. Krasnikov. Improved Buck and Boost Converters for High-power Applications. 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 4–7 June, 2007, Vigo, Spain.
7. Писарев А., Черников А., Сурма А. Мощные мягкие быстровосстанавливающиеся диоды для высокоэффективных инверторных систем: www.proton-electrotex.com/ru/articles/moshhnyemyagkie-bystrvosstanavlivayushhiesya
8. Государство ждёт оппонента: эксперты обсудили, как сделать отечественную электронику доходной. Современная электроника. 2017. № 8.

РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ
ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ



СВЯЗЬ

Информационные и коммуникационные
технологии

24—27 апреля 2018

30-я юбилейная
международная выставка

Организатор:



При поддержке:

- Министерства промышленности и торговли РФ
- Федерального агентства связи (РОССВЯЗЬ)
- Российской ассоциации электронных коммуникаций (РАЭК)

Под патронатом ТПП РФ

Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр»

www.sviaz-expo.ru

12+ Реклама





14-й МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ

ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ — ОСНОВА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ

проводится в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 апреля 2014 г. № 541-р

**15-17 мая 2018 г.,
Москва, ВДНХ,
павильон 75, «Россия»**

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ
ВЫСТАВКИ



ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Консолидация усилий власти, науки и бизнеса в развитии отечественного приборостроения для обеспечения нужд промышленности и оборонного комплекса страны, а также повышение эффективности российской системы измерений, совершенствование нормативной базы метрологии с учетом международных тенденций в целях поддержки инноваций и их продвижения.

ПРОГРАММА ФОРУМА



METROLEXPO

Метрология и Измерения

14-я выставка средств измерений, испытательного оборудования и метрологического обеспечения.



CONTROL&DIAGNOSTIC

Контроль и Диагностика

7-я выставка промышленного оборудования и приборов для технической диагностики и экспертизы.



RESMETERING

Учёт энергоресурсов

7-я выставка технологического и коммерческого учета энергоресурсов.



LABTEST

Лабораторное оборудование

6-я выставка аналитических приборов и лабораторного оборудования промышленного и научного назначения.



PROMAUTOMATIC

Приборостроение и автоматизация

6-я выставка оборудования и программного обеспечения для технологических и производственных процессов.



WEIGHT SALON

Весовой салон

2-я выставка весового оборудования.

Организаторы



РОССТАНДАРТ

Поддержка



Международные партнеры



Стратегический
партнер



Ключевые
партнеры выставки



Генеральный
партнер



Устроитель
и выставочный оператор



ДИРЕКЦИЯ ФОРУМА

129344, Москва, ул. Искры, д. 31, корп. 1
Тел./Факс: +7 (495) 937-40-23 (многоканальный)

www.metrol.exprom.ru
E-mail: metrol@exprom.ru

Реклама