

# Высоковольтные силовые полевые МОП-транзисторы

## с суперпереходом класса 600/650 В

Штеффен Херинг  
(Steffen Hering)

### Введение

Растущие требования к КПД силовой электроники побуждают инженеров непрерывно искать оптимальные решения. Источники питания, блоки управления электроприводом, оборудование возобновляемой энергетики, светотехника — вот типичные области применения на быстрорастущих рынках, где от силовых полупроводниковых компонентов требуется максимальная экономическая эффективность. А это подразумевает высочайший КПД как в статических режимах, так и на все возрастающих частотах переключения. Силовые полевые МОП-транзисторы на обычных полупроводниковых структурах (например, планарной конструкции) зачастую уже находятся на физическом пределе своих возможностей. В этой связи компания Renesas разработала принципиально новую линейку силовых полевых МОП-транзисторов с так называемыми гетеропереходами. Она отвечает указанным выше требованиям как по статическим, так и по динамическим характеристикам, к которым относятся  $R_{DSon}$  — сопротивление «сток-исток» в открытом состоянии, и  $Q_{GD}$  — заряд емкости «затвор-исток» соответственно.

### Основные формулы и параметры для расчета потерь

В силовом полевом МОП-транзисторе (PMOSFET) сопротивление  $R_{DSon}$  оказывает существенное влияние на статические потери:

$$P = I_D^2 \times R_{DS}$$

В импульсном режиме работы при расчете общих потерь необходимо добавить потери в паразитном диоде. Для этого применяется следующая формула (и соответствующая аппроксимация):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (v_{D0} \times I_F(t) + R_{DSon} \times I^2(t)) dt \approx \frac{1}{3} \times V_{DS} I_D (t_r + t_f) + I^2 R_{DSon} \alpha t_{on} f_{SWITCH} + I_F V_{D0} (1 - t_{on} f_{SWITCH}).$$

Мощность, которую потребляет схема управления затвором, можно также считать потерями. На величину этих потерь существенно влияет заряд затвора  $Q_G$ . Расчет выполняется по следующей формуле:

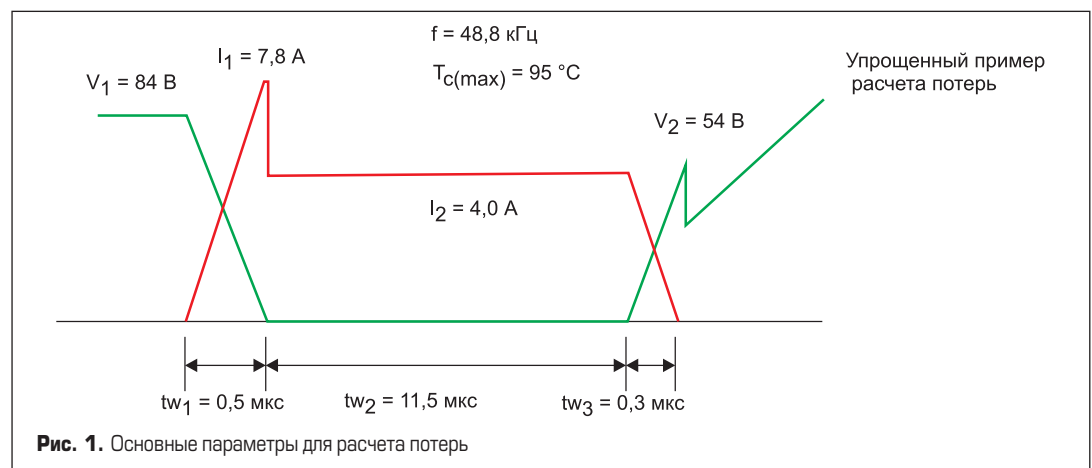
$$P_{DRIVE} = f_{SWITCH} \times Q_G \times \Delta V_{GS}.$$

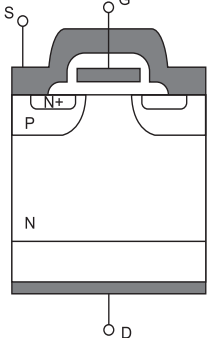
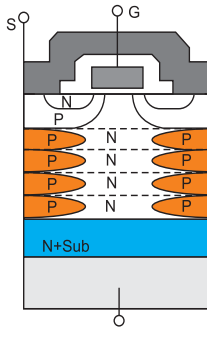
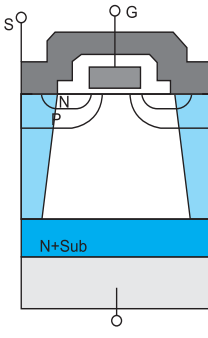
Поэтому на потери влияют как  $R_{DSon}$ , так и  $Q_G$ . Произведение этих двух параметров обозначается термином «показатель качества» и служит простой мерой эффективности транзистора:

$$FOM = R_{DSon} \times Q_G;$$

$$FOM = R_{DSon} \times Q_{GD}.$$

Заряд емкости «затвор-сток» обозначается также символом  $Q_{GD}$ .



Традиционная структура	Структура с суперпереходом	
<b>Renesas</b>	Обычная	<b>Renesas</b>
		
Планарный метод	Метод многоуровневой имплантации с эпитаксиальным наращиванием	Метод глубокой щелевой изоляции

**Рис. 2.** Столбики полупроводника p-типа внутри полупроводника n-типа, образующие структуру с глубокой щелевой изоляцией

Основные формулы для расчета потерь (рис. 1):

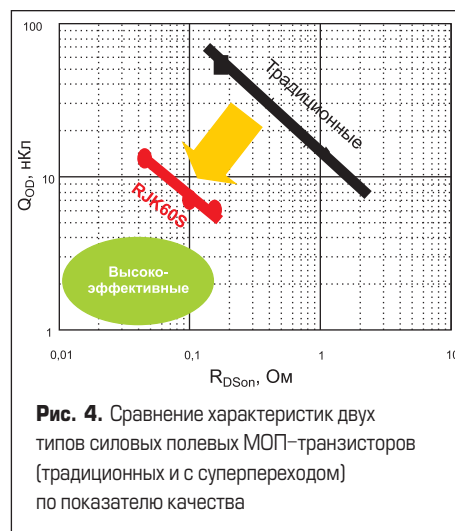
- $P_{ton}$  — потери при включении. Процесс включения:  
 $P_{ton} = 1/6 \times I_1 \times V_1 \times tw_1 \times f = 1/6 \times 7,8 \text{ A} \times 84 \text{ В} \times 0,5 \text{ мкс} \times 48,8 \text{ кГц} = 2,66 \text{ Вт}$
- $P_{on}$  — статические потери:  
 $P_{on} = I_2^2 \times R_{DSonmax} \times \alpha \times tw_2 \times f = (4 \text{ A})^2 \times 0,16 \text{ Ом} \times 2,0 \times 11,5 \text{ мкс} \times 48,8 \text{ кГц} = 2,87 \text{ Вт}$
- $P_{toff}$  — потери при выключении. Процесс выключения:  
 $P_{toff} = 1/6 \times I_2 \times V_2 \times tw_3 \times f = 1/6 \times 4,0 \text{ A} \times 54 \text{ В} \times 0,3 \text{ мкс} \times 48,8 \text{ кГц} = 0,53 \text{ Вт}$
- $P_{total}$  — общие потери:  
 $P_{total} = P_{ton} + P_{on} + P_{toff} = 2,66 \text{ Вт} + 2,60 \text{ Вт} + 0,53 \text{ Вт} = 5,8 \text{ Вт}$

Компания Renesas разработала совершенно новую линейку продукции — силовые полевые МОП-транзисторы с суперпереходом (SJ-PMOSFET). Диапазон напряжений 600–650 В вкуче с диапазоном токов 6,1–55 А охватывают большую часть бытовых и промышленных применений. Низкие значения  $R_{DSon}$  и  $Q_G$  дают показатель качества, позволяющий создавать устройства с высокой энергоэффективностью. По статическим потерям эта линейка продукции имеет явное преимущество в сравнении со структурами, традиционно применяемыми в силовых полевых МОП-транзисторах. На более высоких частотах (свыше 50 кГц) силовые полевые МОП-транзисторы с суперпереходом существенно выигрывают по общим потерям даже у IGBT.

Обычно силовые полевые МОП-транзисторы с суперпереходом изготавливаются на подложке типа  $n^+$ . Их структура образована множеством слоистых столбиков полупроводника p-типа внутри слаболегированного полупроводника n-типа. Столбики выращиваются слой за слоем путем поэтап-

ной эпитаксии. При этом увеличивается общая толщина имплантированного слоя, пока не будет достигнуто заданное значение предельно допустимого напряжения. Этот вариант технологического процесса показан на рис. 2 (в центре). Недостатки данного варианта — относительно низкая скорость эпитаксиального выращивания столбиков и сложность процесса, обусловленная многократным повторением этапов.

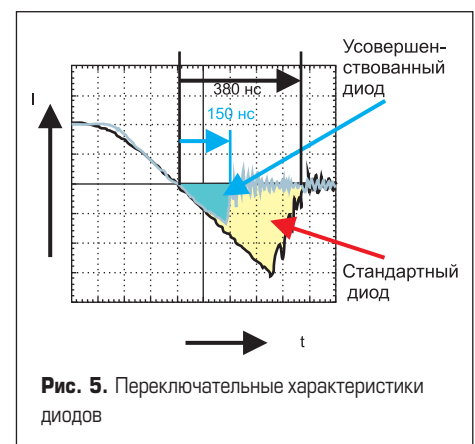
Компания Renesas разработала новый проприетарный метод построения структур с суперпереходом, который свободен от указанных недостатков. В этом методе применяется так называемая глубокая щелевая изоляция (deep-trench technique). Технологический процесс с использованием глубокой щелевой изоляции предусматривает вытравливание щелей в слаболегированном n-полупроводнике для образования p-областей. Структура с глубокой щелевой изоляцией показана



на рис. 2 справа. За счет надежного технологического процесса, высокоточного позиционирования маски и легирования в сочетании с миниатюризацией столбиков полупроводника p-типа удается достичь очень низких значений  $R_{DSon}$  и чрезвычайно малой внутренней емкости, которая, в свою очередь, обуславливает низкие значения  $Q_G$  ( $Q_{GD}$ ). Тем самым обеспечивается наилучший показатель качества. На рис. 3 показана структура с глубокой щелевой изоляцией в разрезе.

Один из продуктов этого семейства — транзистор RJK60S5DPK на предельно допустимое напряжение 600 В и ток 20 А, имеющий великолепные статические и динамические характеристики. Удельное сопротивление этой структуры приблизительно на 52% ниже, чем у традиционных структур (рис. 4). Исключительно низкие значения заряда емкости «сток-исток»  $Q_{GD}$ , которые примерно на 80% меньше, чем у традиционных структур, обеспечивают коммутацию на высоких частотах с малыми потерями. Преимущество для пользователя в сравнении с традиционными структурами — низкое тепловыделение, позволяющее проектировать более компактные схемы с использованием корпусов и радиаторов меньшего размера.

Имеется модификация данного устройства, включающая усовершенствованный диод с накоплением заряда, который за счет повышенной частоты переключения позволяет еще больше снизить потери коммутации, а значит, и тепловыделение (рис. 5). В ближайшие годы семейство силовых



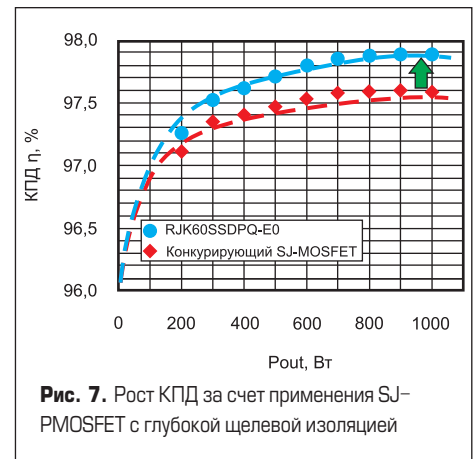
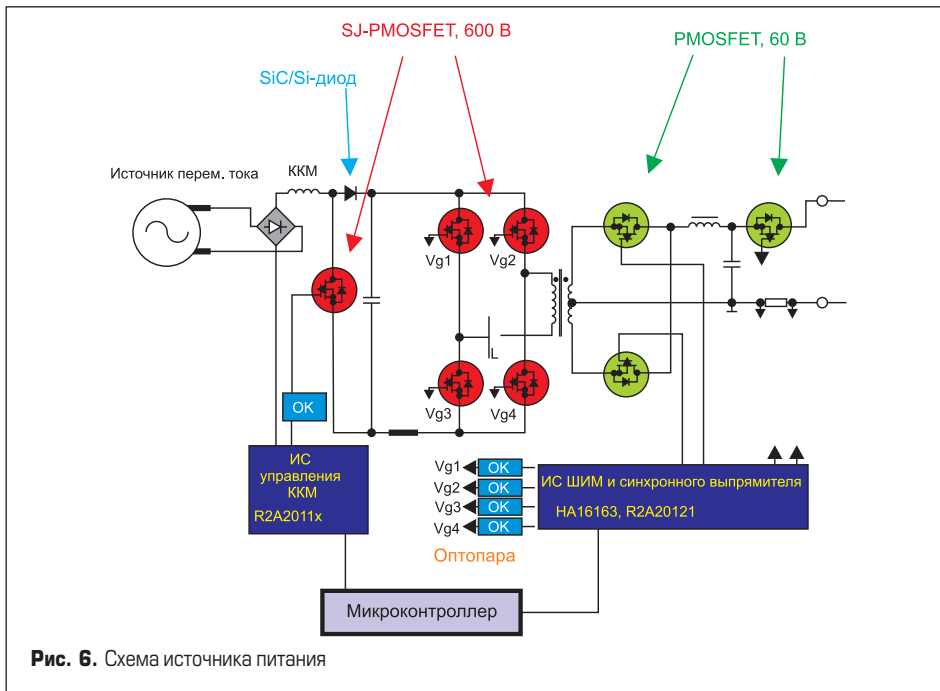


Рис. 7. Рост КПД за счет применения SJ-PMOSFET с глубокой щелевой изоляцией

полевых МОП-транзисторов с суперпереходом будет постоянно пополняться модификациями на новые диапазоны токов и более высокие классы напряжения. Кроме того, Renesas будет выпускать варианты с характеристиками, оптимизированные под конкретные области применения.

**Пример применения: источник питания**

Проиллюстрируем возрастающие требования к эффективности изделий на примере источника питания с синхронным выпрямителем, схема которого показана на рис. 6. В этой схеме на первичной стороне имеются цепь коррекции коэффициента мощности (ККМ) и H-мост, в которых применены силовые полевые МОП-транзисторы с суперпереходом, выполненные по технологии глубокой щелевой изоляции. На вторичной стороне используются силовые полевые МОП-транзисторы на среднее напряжение (60 В). Помимо дискретных, все прочие основные компоненты — ИС корректора коэффициента мощности, ИС синхронного выпрямителя, оптопара для гальванической развязки сигналов управления и микроконтроллер для управления всей схемой — также взяты из ассортимента Renesas. Примененные здесь силовые полевые МОП-транзисторы с суперпереходом вносят решающий вклад в повышение КПД источника питания.

График на рис. 7 демонстрирует рост КПД, которого удалось достичь за счет использования описанного здесь транзистора SJ-PMOSFET с глубокой щелевой изоляцией вместо конкурирующего продукта с эпитаксиальной структурой.

**Поддержка онлайнного подбора компонентов**

Реорганизовав и усовершенствовав уже знакомые пользователям функции поис-

ка по перекрестным ссылкам и параметрического поиска, компания Renesas значительно упростила процесс подбора компонентов. Возможность подбора устройства по области применения, помимо чисто технических параметров, — это огромное дополнительное преимущество для пользователей.

Описанные ниже функции подбора компонентов доступны на центральном веб-сайте <http://www.renesas.eu/products/discrete/peer/guide.jsp>. Четкая схема алгоритма работы (рис. 8) помогает сделать выбор. Начав с предполагаемой области применения и топологии разрабатываемой схемы, пользователь щелчком мыши в соответствующем поле вызывает

нужную функцию — поиск по перекрестным ссылкам, параметрический поиск или обзор компонентов.

Страница подбора по перекрестным ссылкам (рис. 9) [www.renesas.eu/req/other\\_product\\_search.do?event=otherProductSearch](http://www.renesas.eu/req/other_product_search.do?event=otherProductSearch) помогает найти ближайший аналог заданного конкурирующего устройства в ассортименте продукции Renesas. Там, где это целесообразно, предлагается несколько вариантов. Наиболее важные параметры отображаются непосредственно, а также предоставляется возможность загрузить полный паспорт устройства.

Перекрестные ссылки имеются не только для новой серии силовых полевых МОП-транзисторов с суперпереходом (SJ-PMOSFET), но и для всего ассортимента продукции. Для многих продуктов, и в частности для SJ-PMOSFET, можно дополнительно загрузить набор SPICE-параметров, позволяющий моделировать основные особенности работы устройства еще до получения образцов.

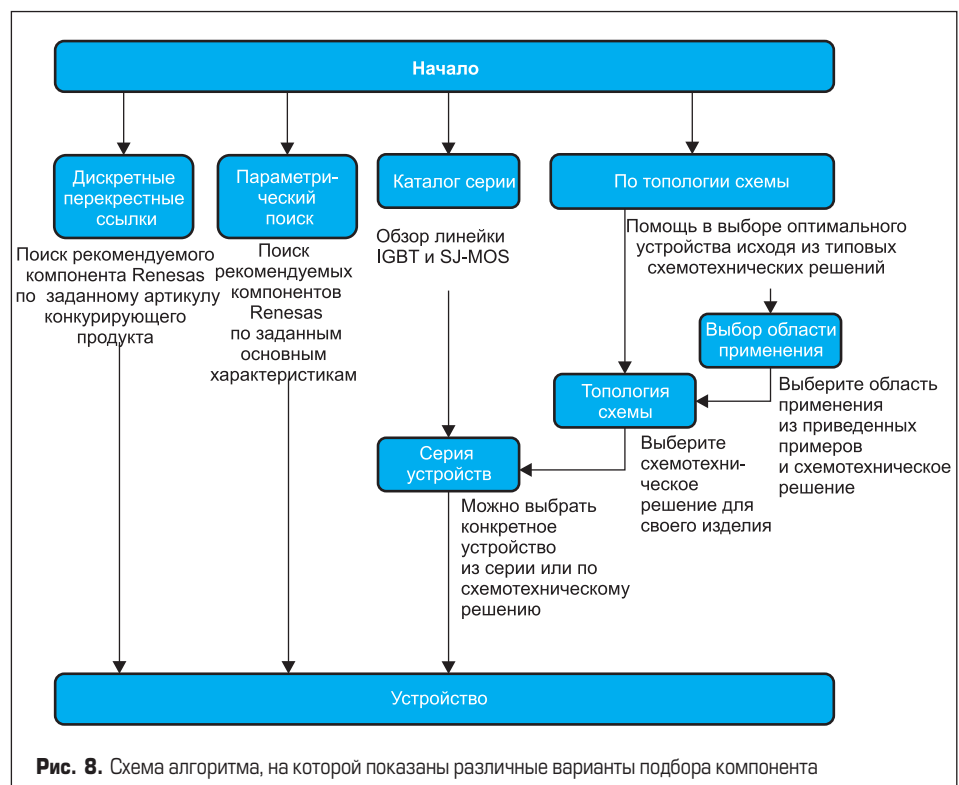


Рис. 8. Схема алгоритма, на которой показаны различные варианты подбора компонента

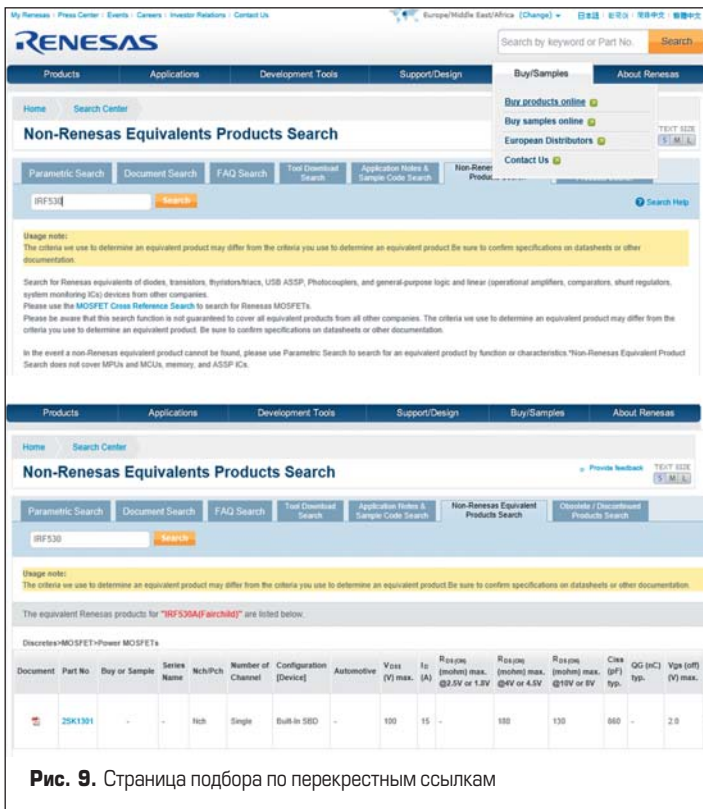


Рис. 9. Страница подбора по перекрестным ссылкам

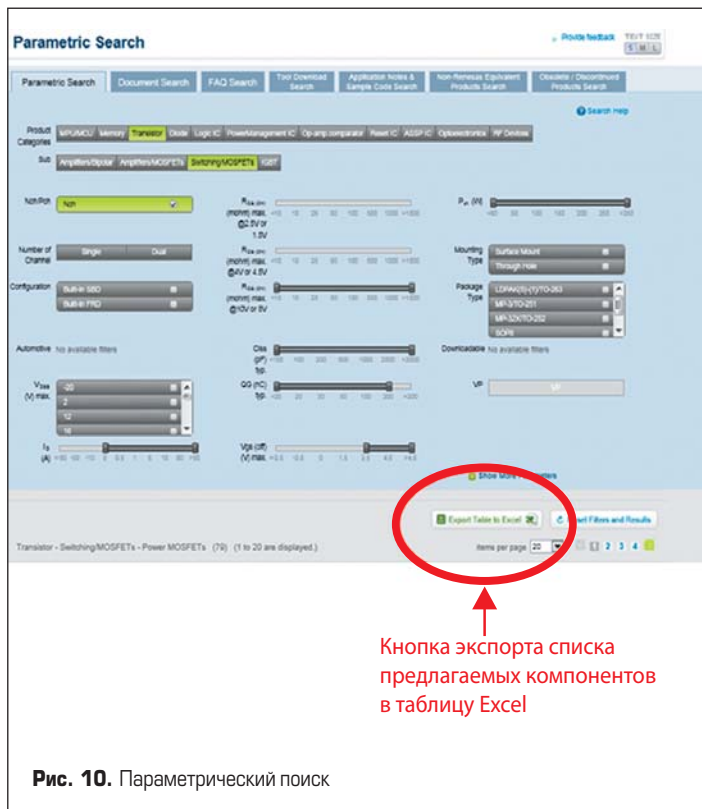


Рис. 10. Параметрический поиск

Кнопка экспорта списка предлагаемых компонентов в таблицу Excel

Другой способ подбора компонентов — параметрический поиск (рис. 10), доступный на следующей странице: [www.renesas.eu/req/parametric\\_search.do?prdCategoryKey=12&selectedConList=&region=](http://www.renesas.eu/req/parametric_search.do?prdCategoryKey=12&selectedConList=&region=). Здесь можно сузить объем поиска нужных компонентов, введя значения параметров или выбрав их щелчком мыши либо перемещением ползунка. После этого выводится список предлагаемых компонентов. Крайне полезная дополнительная возможность этой функции — экспорт списка компонентов в электронную таблицу Excel для дальнейшей обработки.

Еще один способ подбора компонентов предполагает брать в качестве отправной точки не характеристики устройства, а тип разрабатываемого изделия (область применения) и его топологию (рис. 11). Этот весьма практичный подход позволяет разработчику быстро получить представление о том, какие устройства предлагаются для применения в схемах выбранной топологии.

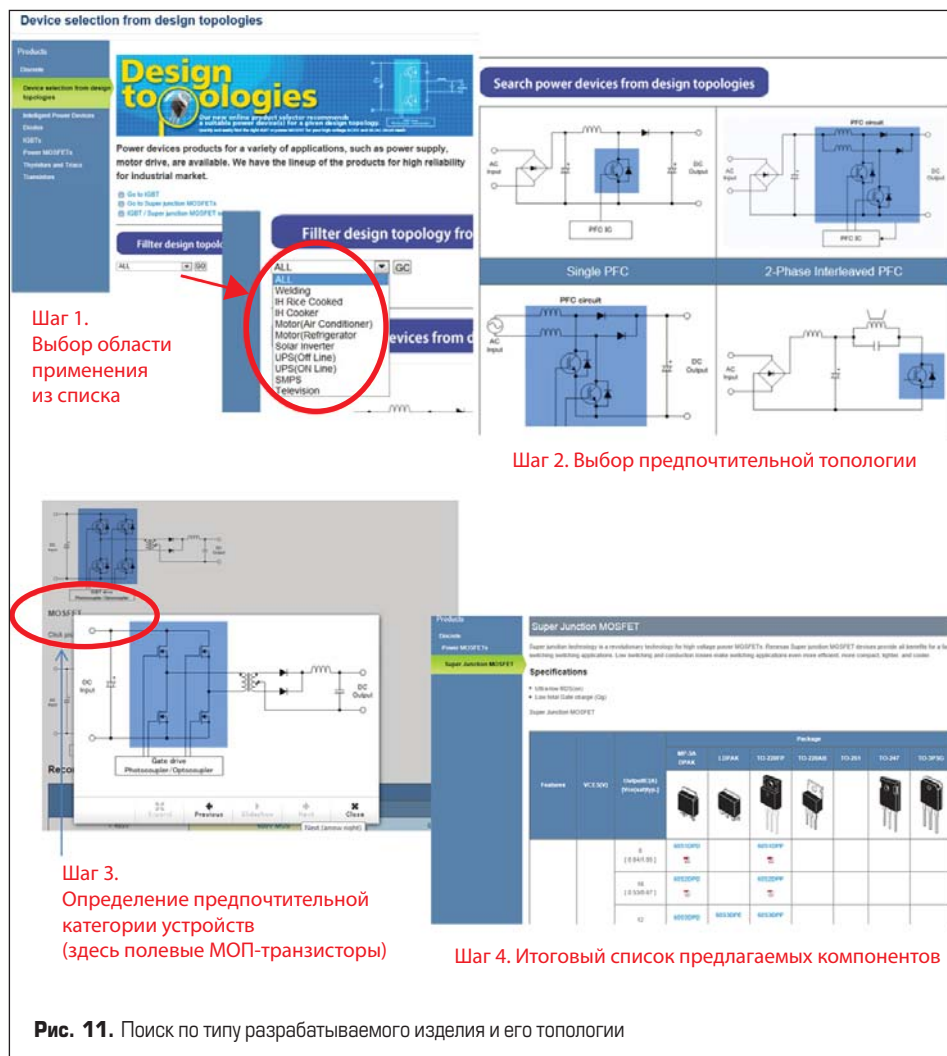
**Поддержка онлайн-моделирования**

Помимо возможности оценить общую пригодность силового полевого МОП-транзистора с суперпереходом для применения в конкретной схеме с помощью Spice-параметров на своем компьютере, Renesas предлагает также воспользоваться комплексной средой моделирования под названием Power<sup>®</sup> SIM на домашней странице компании (рис. 12).

Эта среда предоставляется пользователям бесплатно. С ее помощью можно, например, для заданной топологии схемы и компонентов смоделировать формы сигналов, частот-

ную характеристику, тепловые режимы, КПД и т. п. (рис. 13). Функциональные возможности данной среды моделирования постоянно

расширяются. Она представляет собой идеальный способ существенно ускорить процесс разработки, приложив минимум усилий.



Шаг 1. Выбор области применения из списка

Шаг 2. Выбор предпочтительной топологии

Шаг 3. Определение предпочтительной категории устройств (здесь полевые МОП-транзисторы)

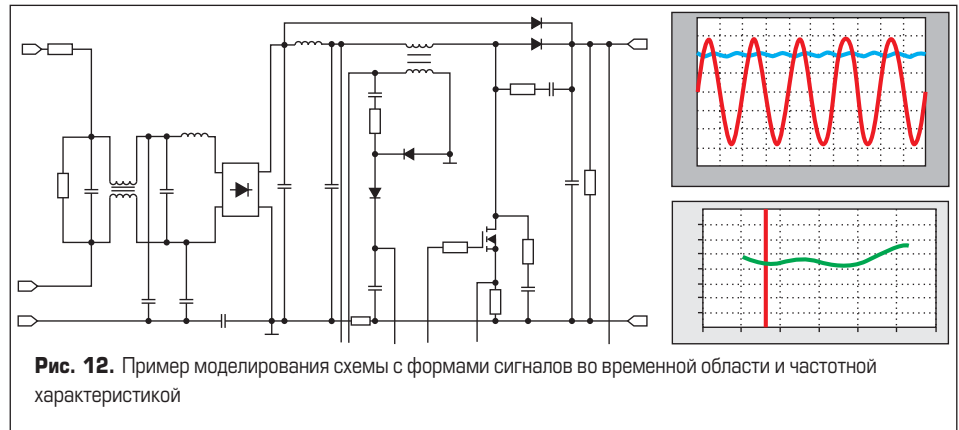
Шаг 4. Итоговый список предлагаемых компонентов

Рис. 11. Поиск по типу разрабатываемого изделия и его топологии

**Вывод**

Разработанная компанией Renesas серия силовых полевых МОП-транзисторов с суперпереходом (Super Junction PowerMOSFET) на базе проприетарной технологии глубокой щелевой изоляции устанавливает новую планку КПД силовых полупроводниковых компонентов. Это позволяет существенно повысить энергоэффективность конечной продукции. Полностью проприетарный технологический процесс гарантирует неизменно высокое качество продукции.

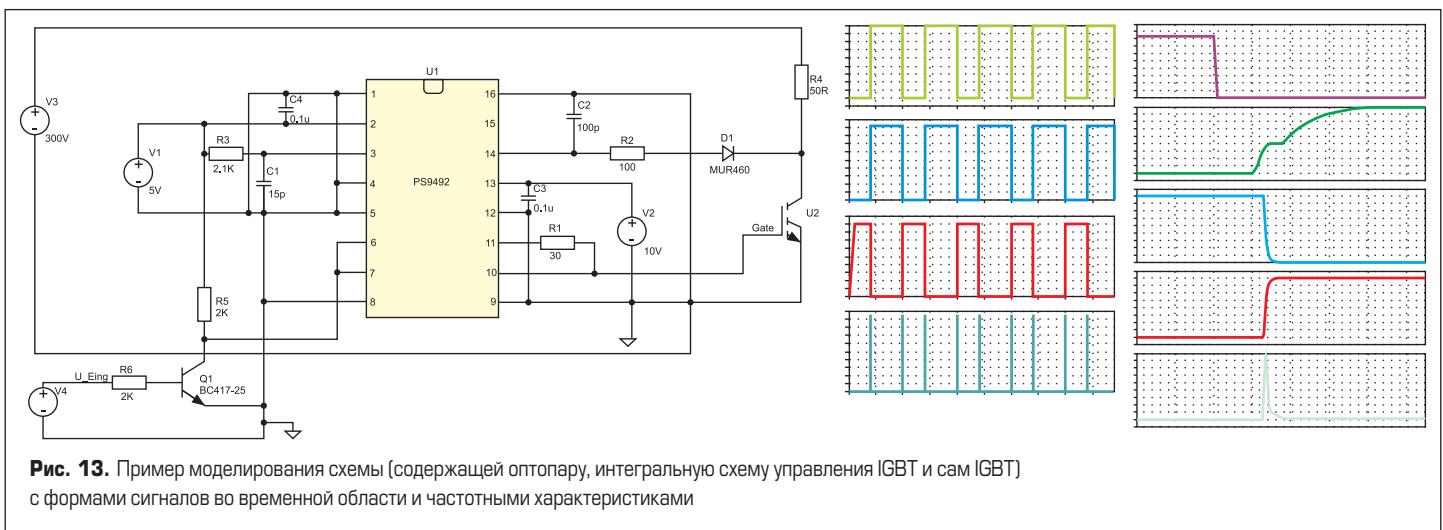
Для пользователей Renesas предлагает ряд удобных онлайн-средств подбора компонентов. Ко всем этим средствам предоставляется централизованный доступ на веб-сайте компании. Возможность подбирать компоненты исходя из предполагаемой топологии схемы — новаторское решение, повышающее



**Рис. 12.** Пример моделирования схемы с формами сигналов во временной области и частотной характеристикой

эффективность процесса подбора. После того как выбор сделан, можно непосредственно смоделировать работу компонентов в конкрет-

ной схеме с помощью бесплатного онлайн-средства Power<sup>e</sup> SIM, ускоряющего процесс разработки.



**Рис. 13.** Пример моделирования схемы (содержащей оптопару, интегральную схему управления IGBT и сам IGBT) с формами сигналов во временной области и частотными характеристиками