

# Бесснабберный обратноходовой преобразователь на новых MOSFET 950 В от Infineon

Вячеслав Гавриков

Новое семейство транзисторов CoolMOS P7 950 В производства компании Infineon разработано специально для создания обратноходовых преобразователей, работающих в режиме квазирезонанса или непрерывных токов. По сравнению с предшественниками новые транзисторы отличаются невысоким собственным сопротивлением, минимальным зарядом затвора и малой энергией на переключения. Кроме того, CoolMOS P7 обеспечивают высокий уровень надёжности и позволяют отказаться от снабберных цепей, что дополнительно уменьшает габариты и стоимость обратноходовых преобразователей.

Требования к современным источникам питания все время ужесточаются. Это касается в первую очередь эффективности, стоимости и габаритов. При этом, даже минимальное повышение КПД или малозаметное уменьшение габаритов требуют значительных усилий от разработчиков. В погоне за самыми незначительными улучшениями производители источников питания вынуждены постоянно совершенствовать схемотехнику, искать оптимальные силовые ключи, экспериментировать с новыми технологиями.

В настоящее время для создания источников питания малой и средней мощности чаще всего применяют обратноходовую топологию. Несмотря на то, что эта топология хорошо изучена, она по-прежнему не исчерпала свой потенциал с точки зрения повышения эффективности, снижения габаритов и сокращения стоимости. В частности, одним из недостатков обратноходовых преобразователей является необходимость использования снабберной RCD-цепочки или схемы активного ограничения для защиты силового транзистора от пробоя. Наличие RCD-цепи приводит к появлению дополнительных потерь мощности, увеличению габаритов и росту стоимости. Решить эти проблемы можно «в лоб», убрав этот элемент схемы, однако в таком случае необходимо, чтобы силовой ключ обладал достаточным запасом «прочности». Именно для подобных случаев и было разработано новое семейство транзисторов 950 В CoolMOS P7.

## 1. Обратногоходовые преобразователи: особенности и режимы работы

Обратногоходовая топология (рисунок 1) чаще других используется для создания источников питания. Это объясняется её преимуществами: простотой, понятностью, невысокой стоимостью, достойными показателями эффективности.

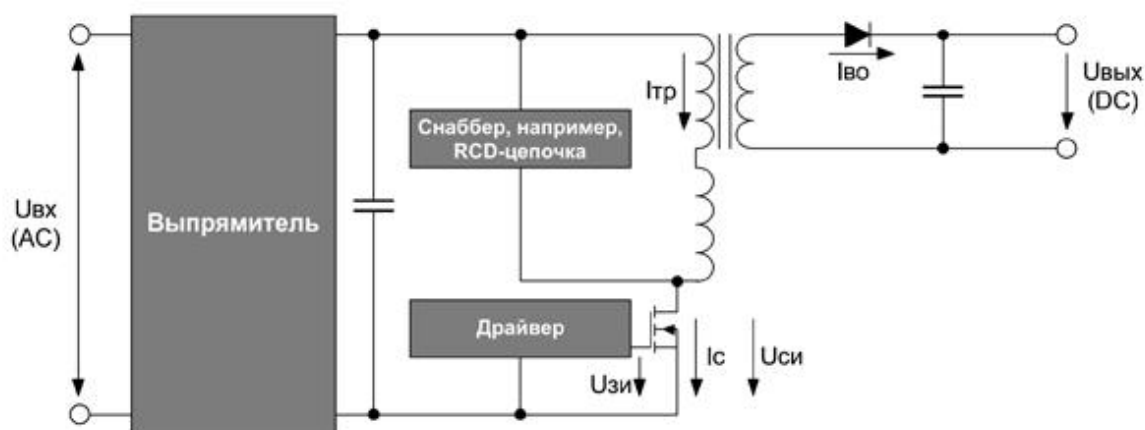


Рис. 1. Упрощённая схема обратноходового преобразователя

У обратноходовых преобразователей есть несколько режимов работы [1].

**Режим непрерывных токов (Continuous Current Mode, CCM)** характеризуется тем, что ток в первичной обмотке трансформатора никогда не уменьшается до нуля (рисунок 2а). Такой режим обеспечивает повышенную выходную мощность. Вместе с тем, силовым ключам приходится работать в условиях жёстких переключений. Новые транзисторы CoolMOS P7 обеспечивают рекордно малое значение  $E_{oss}$  и становятся идеальным выбором для обратноходовых преобразователей с CCM.

В недорогих преобразователях используются бюджетные контроллеры с фиксированной частотой коммутации. Однако, при малой нагрузке КПД таких источников оказывается невысоким. Чтобы улучшить ситуацию, в дорогих преобразователях при уменьшении нагрузки происходит переключение на режим с прерывистыми токами.

**Режим прерывистых токов (Discontinuous Conduction Mode, DCM)** характеризуется тем, что часть периода ток через обмотки трансформатора не течёт, при этом частота коммутаций остаётся фиксированной (рисунок 2б). Переключения при нулевом токе приводят к тому, что потери на включение  $E_{on}$  уменьшаются. В последнее время режим DCM используют достаточно редко из-за появления продвинутых контроллеров, поддерживающих более эффективный режим квазирезонанса.

**Режим квазирезонанса (QR)** также предполагает работу с прерывистыми токами, однако, в отличие от DCM, коммутация силовых ключей производится с учётом колебаний контура, состоящего из индуктивности трансформатора и суммарной ёмкости стока. При этом, переключение происходит не только при нулевом токе, но и при минимальном напряжении «сток-исток», что, в свою очередь, гарантирует малое значение потерь коммутации (рисунок 2в).

Стоит отметить, что существуют и другие режимы коммутаций обратноходовых преобразователей, например, ZVS, но они используются в более дорогих источниках питания с высокой выходной мощностью и не являются целевыми приложениями для транзисторов CoolMOS P7.

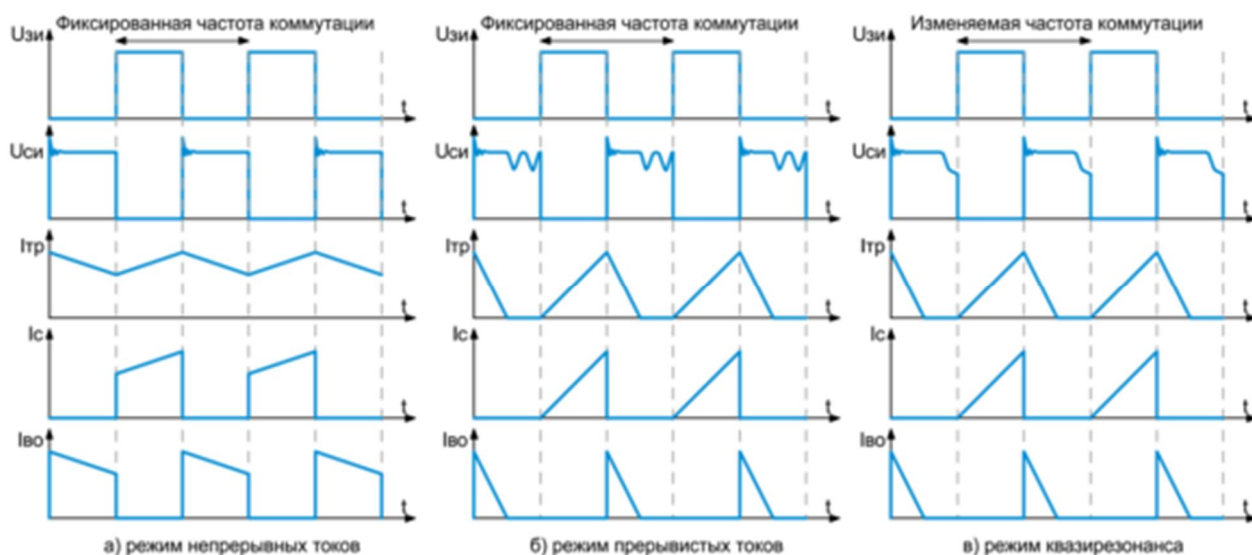


Рис. 2. Диаграммы токов и напряжений при работе обратноходового преобразователя в различных режимах

Повысить эффективность обратноходовых преобразователей можно за счёт исключения снабберной RCD-цепочки, которая применяется для ограничения звона, возникающего при отключении силового транзистора (рисунок 3). Использование снабберной цепи приводит к увеличению потерь. Эти потери связаны с необходимостью перезаряда RCD-цепочки в каждом цикле коммутации, вне зависимости от величины нагрузки, а также с увеличением суммарной ёмкости, подключённой к стоку транзистора, что в свою очередь приводит к росту энергии, теряемой при переключениях.

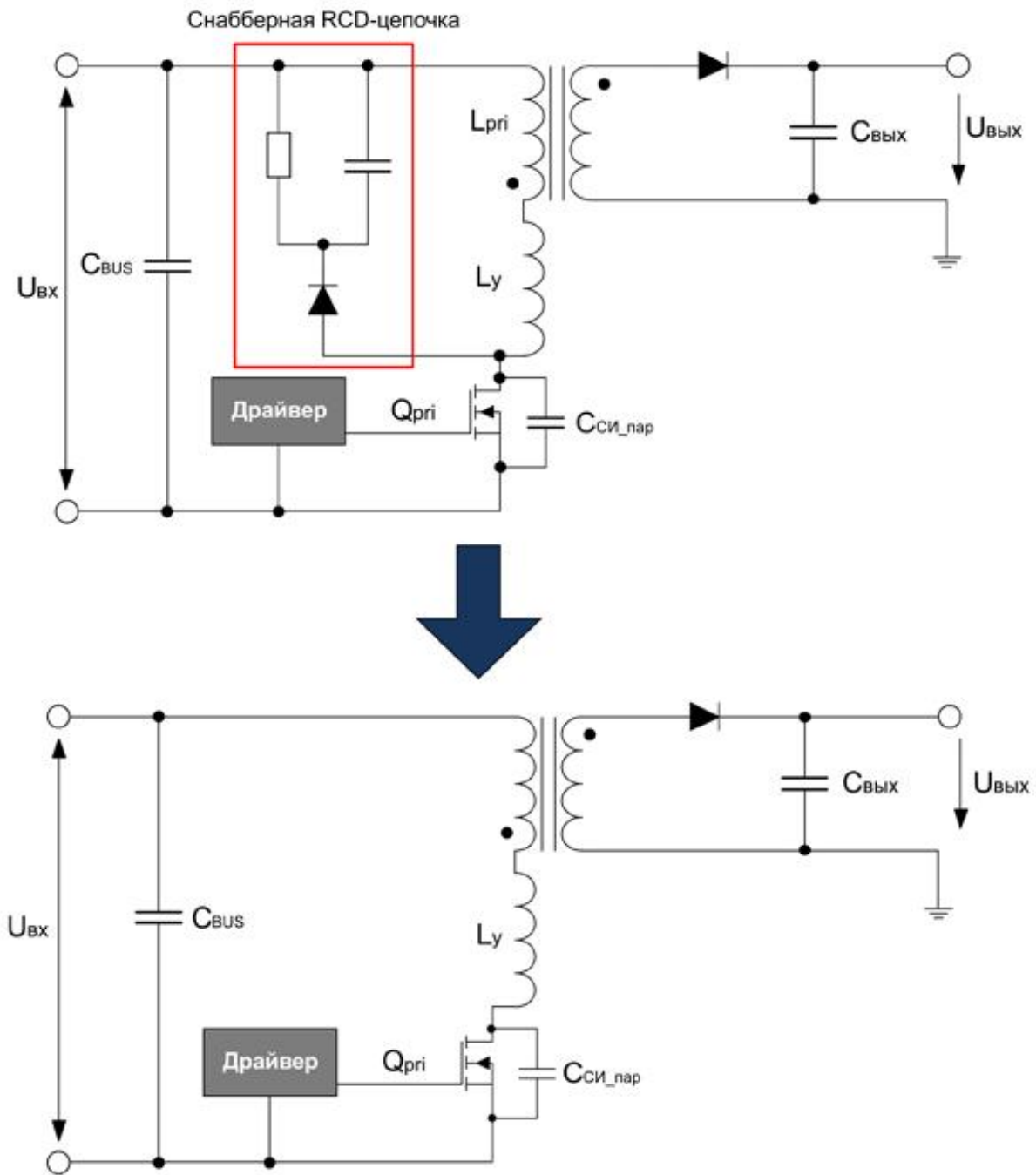


Рис. 3. Отказ от защитной RCD-цепочки позволяет уменьшить стоимость и габариты преобразователя, но требования к силовому транзистору возрастают

Отказ от защитной RCD-цепочки также позволяет уменьшить габариты и стоимость преобразователей, что является важным преимуществом для бюджетных и компактных маломощных источников питания. Вместе с тем, исключение снабберной цепи возможно только в том случае, если используемый транзистор сможет выдержать возникающие перепады напряжения без повреждения. Здесь следует сделать краткое пояснение относительно природы этих перенапряжений.

При включении транзистора ток начинает протекать через первичную обмотку трансформатора. При отключении транзистора накопленная энергия передаётся в нагрузку на вторичной стороне. В то же время из-за наличия индуктивности рассеяния не вся энергия оказывается на вторичной стороне. Часть энергии остаётся на первичной стороне и рассеивается в виде колебаний LC-контура, образованного индуктивностью рассеяния трансформатора и паразитной ёмкостью, подключённой к стоку транзистора. Паразитная ёмкость, в свою очередь, образована собственной выходной ёмкостью транзистора, паразитной ёмкостью трансформатора, ёмкостью проводников и т.п.

При наличии снабберной цепи происходит ограничение амплитуды колебаний. Если же RCD-цепь отсутствует, то транзистор должен самостоятельно обеспечивать необходимый запас по напряжению чтобы колебания в LC-контуре не приводили к необратимому пробое (рисунок 4). Обычно запас составляет 10...20%. Иногда для того, чтобы ограничить уровень звона, используют дополнительный конденсатор, включённый параллельно с силовым ключом, но уровень потерь при этом возрастает.

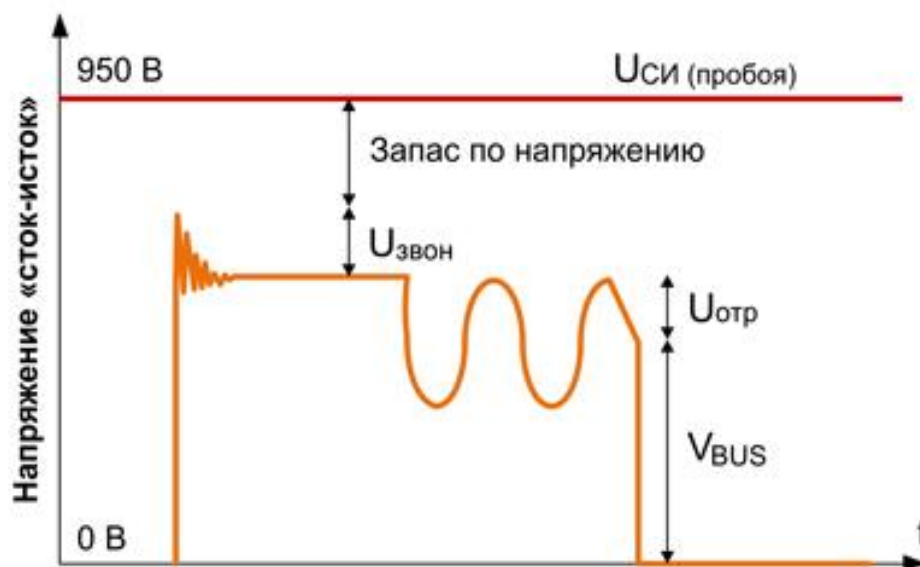


Рис. 4. При отсутствии защитной RCD-цепочки транзистор должен иметь повышенный запас по напряжению [1]

Стоит помнить, что при коммутациях могут возникать не только «штатные» перенапряжения. В реальных приложениях невозможно застраховаться от возникновения аварийных ситуаций и мощных высоковольтных помех. По этой причине при создании обратноходовых преобразователей разработчики должны дополнительно оценивать реальную устойчивость силовых ключей к пробое.

С учётом всех перечисленных проблем и особенностей компания Infineon создала новое семейство специализированных транзисторов 950 В CoolMOS P7, которые не только демонстрируют минимальный уровень статических и динамических потерь, но и обеспечивают высокий уровень запаса даже при отсутствии защитной снабберной цепи. Кроме того, в документации на CoolMOS P7 приводятся параметры пиковых токов и энергии переключений, позволяющие оценить устойчивость этих ключей к пробую в реальных приложениях.

## 2. Обзор транзисторов CoolMOS P7 от Infineon

В отличие от популярного семейства универсальных транзисторов **CoolMOS C3**, новое семейство CoolMOS P7 разрабатывалось специально для создания обратноходовых преобразователей малой и средней мощности (10...150 Вт). Применение CoolMOS P7 в других типах преобразователей, например, в составе синхронных мостовых и полумостовых схем с жёсткими приключениями, не рекомендуется. Вместе с тем, новые транзисторы благодаря узкой специализации превосходят конкурентов и предшественников и демонстрируют отличные показатели в целевых приложениях.

В настоящий момент семейство CoolMOS P7 объединяет 15 моделей (рисунок 5, таблица 1):

- с рабочим напряжением 950 В;
- с сопротивлением открытого канала 0,45...3,7 Ом;
- с током стока 2...14 А;
- с импульсным током до 43 А;
- с зарядом затвора от 6 нКл;
- с четырьмя вариантами корпусных исполнений: TO-251, TO-220, DPAK, SOT



Рис. 5. Новое семейство 950 В транзисторов CoolMOS P7 [3]

Таблица 1. Номенклатура и характеристики транзисторов CoolMOS P7 [3]

Наименование	V <sub>си макс.</sub> , В	R <sub>си вкл. макс.</sub> , Ом	I <sub>с макс.</sub> , А	I <sub>с имп. макс.</sub> , А	Q <sub>з, нКл</sub>	Корпус
IPA95R450P7XKSA1	950	0,45	14	43	35	TO-220 FullPAK
IPU95R450P7AKMA1	950	0,45	14	43	35	IPAK (TO-251)
IPD95R450P7ATMA1	950	0,45	14	43	35	DPAK (TO-252)
IPU95R750P7AKMA1	950	0,75	9	27	23	IPAK (TO-251)
IPD95R750P7ATMA1	950	0,75	9	27	23	DPAK (TO-252)
IPA95R750P7XKSA1	950	0,75	9	27	23	TO-220 FullPAK
IPA95R1K2P7XKSA1	950	1,2	6	16	15	TO-220 FullPAK
IPD95R1K2P7ATMA1	950	1,2	6	16	15	DPAK (TO-252)
IPN95R1K2P7ATMA1	950	1,2	6	16	15	SOT-223
IPU95R1K2P7AKMA1	950	1,2	6	16	15	IPAK (TO-251)
IPU95R2K0P7AKMA1	950	2	4	10	10	IPAK (TO-251)
IPD95R2K0P7ATMA1	950	2	4	10	10	DPAK (TO-252)
IPN95R2K0P7ATMA1	950	2	4	10	10	SOT-223
IPU95R3K7P7AKMA1	950	3,7	2	5	6	IPAK (TO-251)
IPN95R3K7P7ATMA1	950	3,7	2	5	6	SOT-223

Самым простым способом оценки преимуществ транзисторов CoolMOS P7 будет сравнение их ключевых характеристик с предшественниками CoolMOS C3.

### 3. Преимущества транзисторов CoolMOS P7

Первое, что бросается в глаза при сравнении характеристик семейств CoolMOS P7 и CoolMOS C3, это повышенное значение пробивного напряжения 950 В для CoolMOS P7. Конечно, рост запаса по напряжению на 50 В является важным преимуществом, особенно при отсутствии снабберной цепи. Однако у новых транзисторов есть и целый ряд других достоинств [1].

**Снижение сопротивления открытого канала.** Сопротивление открытого канала ( $R_{си}$ ) определяет потери проводимости. При этом важно учитывать зависимость  $R_{си}$  от температуры кристалла. Испытания показывают, что CoolMOS C3 демонстрируют более значительный рост  $R_{си}$  при нагреве по сравнению с CoolMOS P7. Более того, при температуре 80°C сопротивление CoolMOS P7 оказывается на 10% меньше (рисунок 6). При температуре 100°C преимущество достигает 15%.

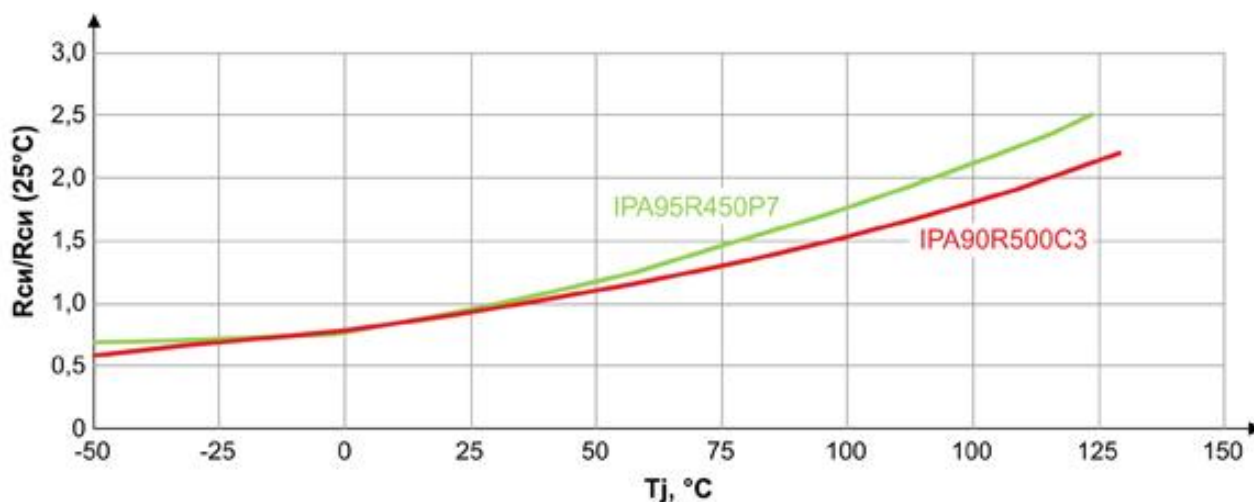


Рис. 6. Сравнение зависимости сопротивлений открытого канала для CoolMOS P7 и CoolMOS C3 [1]

**Уменьшение энергии включения.** В квазирезонансных преобразователях коммутация силовых транзисторов происходит при нулевом токе и минимальном напряжении, что приводит к уменьшению потерь энергии при включения  $E_{on}$  почти до нуля. Вместе с тем потери, связанные с  $E_{oss}$ , никуда не исчезают и вносят значительный вклад в общие потери при включении транзистора.

По сравнению с семейством CoolMOS C3, новые транзисторы CoolMOS P7 обеспечивают меньшее значение  $E_{oss}$  при работе с напряжениями выше 50 В (рисунок 7). А при напряжении 400 В преимущество достигает 50%.

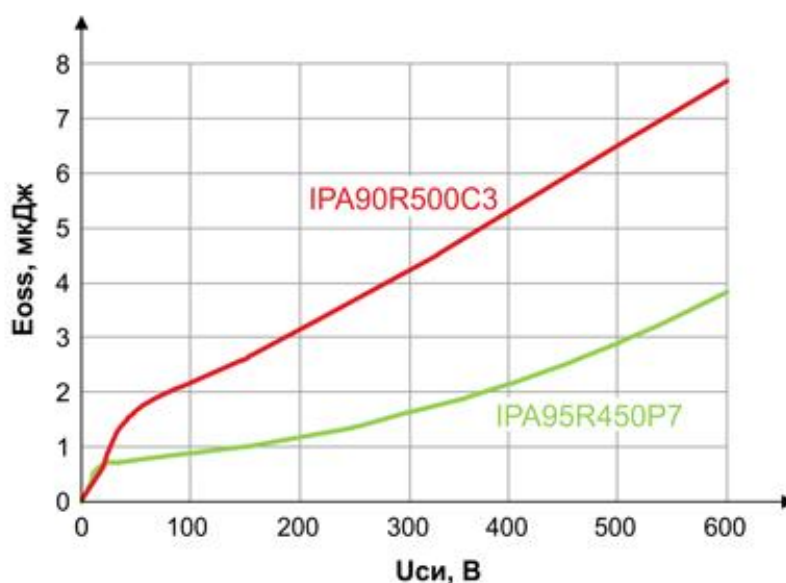


Рис. 7. Сравнение энергии  $E_{oss}$  для CoolMOS P7 и CoolMOS C3 [1]



**Уменьшение заряда затвора.** Заряд затвора  $Q_z$  определяет потери, связанные с управлением силовым транзистором: чем меньше заряд, тем меньше потери. С другой стороны, чем меньше потери, тем выше может быть частота коммутации, и тем компактнее будут габариты преобразователя за счёт уменьшения размеров пассивных компонентов (трансформатора, конденсаторов).

При стандартном управляющем напряжении 8 В заряд затвора для CoolMOS P7 оказывается на 50% меньше, чем у CoolMOS C3 (рисунок 8).

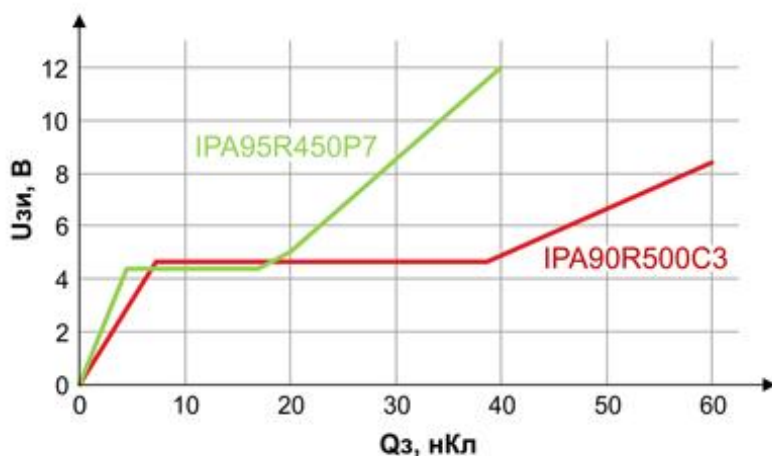


Рис. 8. По сравнению с семейством CoolMOS C3, транзисторы CoolMOS P7 отличаются меньшим зарядом затвора [1]

**Малое и точное значение порогового напряжения.** Пороговое напряжение для транзисторов CoolMOS P7 составляет около 3 В, а его разброс не превышает  $\pm 0,5$  В (рисунок 9). Это позволяет уменьшить потери мощности на управление за счёт снижения напряжения включения.

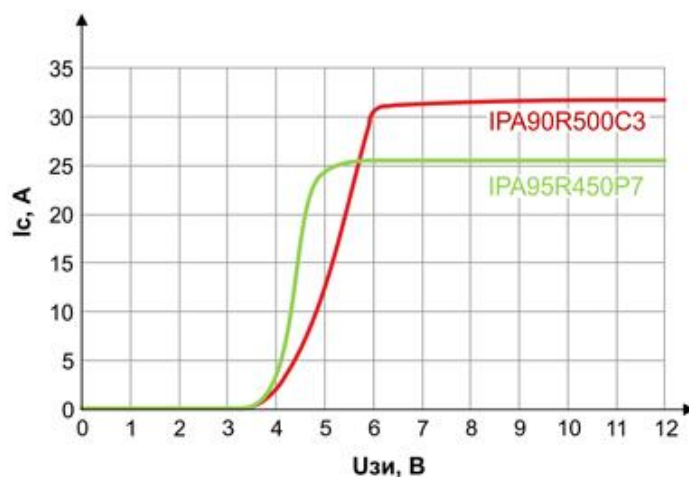


Рис. 9. Сравнение сток-затворных характеристик CoolMOS P7 и CoolMOS C3 [1]

Важным преимуществом CoolMOS P7 становится предсказуемая реакция при возникновении аварийного пробоя.

#### 4. Оценка устойчивости CoolMOS P7 к пробую

При выборе силовых ключей в процессе разработки обратных преобразователей обычно учитывают запас по напряжению на уровне 10...20%. К сожалению, в реальных приложениях это не является гарантией отсутствия мощных высоковольтных импульсов, способных пробить транзистор. По этой причине важно правильно оценить степень защиты преобразователя от мощных помех, особенно при отсутствии снабберной цепи. Чтобы упростить жизнь разработчикам, компания Infineon решила внести в документацию ряд дополнительных параметров, характеризующих пробой транзисторов [1]:

- допустимая энергия одиночного импульса  $E_{AS}$ ;
- допустимая энергия повторяющихся импульсов  $E_{AR}$ ;
- допустимый ток одиночного импульса  $I_{AS}$ .

С допустимым током  $I_{AS}$  все относительно просто. Например, если измерительный резистор составляет 0,2 Ом, а напряжение отключения – 0,3 В, то пороговый ток срабатывания защиты составит 1,5 А. Это значение должно быть меньше, чем допустимое значение, указанное в документации. В частности, для [IPN95R1K2P7](#) величина  $I_{AS}$  составляет 3 А.

При анализе энергии пробоя необходимо знать такие параметры трансформатора как индуктивность намагничивания и индуктивность рассеяния:

$$\frac{1}{2} L \times I^2 \leq E_A \text{ (из документации).}$$

Для расчёта энергии повторяющихся импульсов используется индуктивность рассеяния. Например, если ток составляет 1,5 А, а индуктивность рассеяния – 4,5 мкГн, то значение энергии пробоя составит 5,1 мкДж. Для сравнения, у транзисторов IPN95R1K2P7  $E_{AR}$  равна 140 мкДж.

При анализе устойчивости к одиночным импульсам следует ориентироваться на худший случай и брать в расчёт **полную индуктивность** трансформатора. Например, если в рассматриваемом примере индуктивность трансформатора составляет 500 мкГн, то энергия пробоя будет равна 562 мкДж. Для сравнения, у транзисторов IPN95R1K2P7  $E_{AS}$  составляет 11 мДж.

## 5. Заключение

Новое семейство транзисторов CoolMOS P7 не является универсальным. Оно было разработано специально для построения обратных преобразователей малой и средней мощности 10...150 Вт, работающих в режиме непрерывных токов, или квазирезонанса.

Отказ от универсальности привёл к тому, что по сравнению с предшественниками, например, семейством CoolMOS C3, транзисторы CoolMOS P7 обладают целым рядом преимуществ: малым сопротивлением открытого канала, минимальной энергией  $E_{oss}$ , малыми потерями на управление и так далее. Кроме того, благодаря увеличенному рабочему напряжению и предсказуемому поведению при пробое, CoolMOS P7 позволяют отказаться от использования защитной RCD-цепочки, что дополнительно снижает уровень потерь, сокращает стоимость и уменьшает габариты преобразователей.

### Ссылки

1. [Stefan Preimel. Infineon's first 950 V CoolMOS™ MOSFET developed for low - power applications. Infineon, 2018;](#)
2. [Stefan Preimel. Elevate the performance of flyback topology to the next level Introducing Infineon's new 950 V CoolMOS™ P7. eeNews, 2018;](#)
3. [infineon.com](http://infineon.com)