

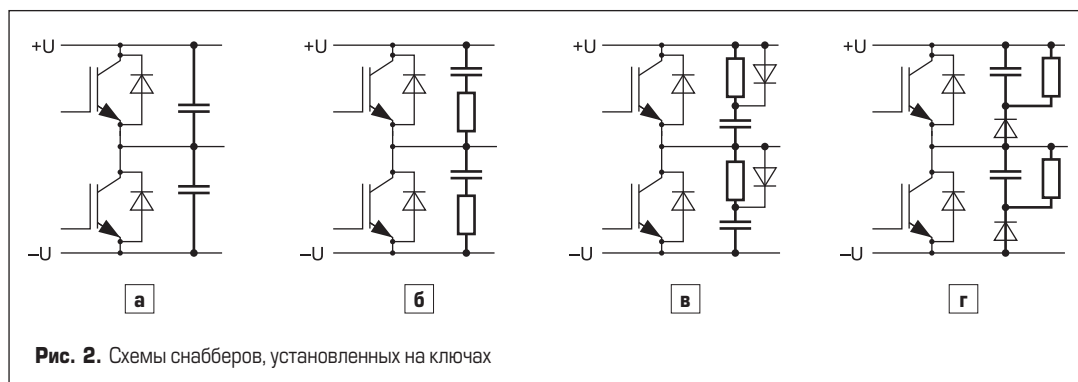
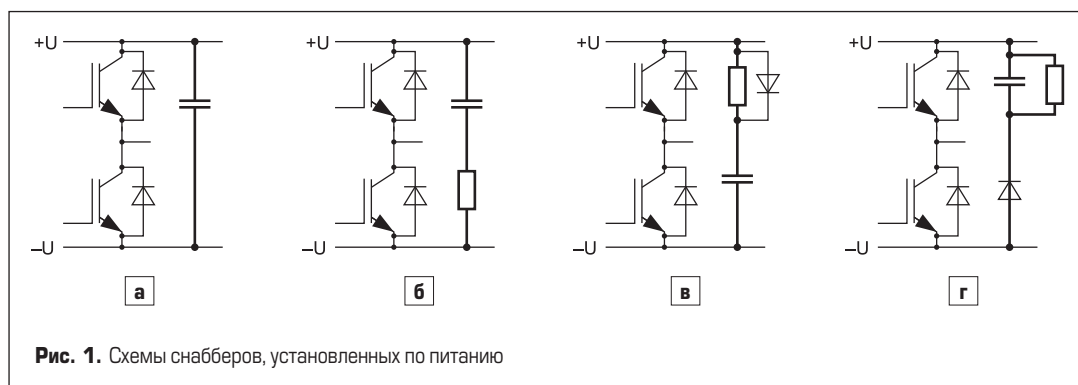
Снаббер — это просто

Пробой коллектор–эмиттер, возникающий при перенапряжении, одна из наиболее распространенных причин выхода из строя транзисторных преобразователей. Виной тому — недостаточно ответственный подход к защитным снабберным цепям инвертора. Но зачастую разработчик закладывает столь сложные снабберные схемы, что на их фоне сам транзисторный инвертор кажется несущественной частью преобразователя. Так как же выбрать правильный снаббер?

Павел Новиков

При работе любого импульсного преобразователя на основе IGBT- или MOSFET-транзисторов неминуемо возникают коммутационные паразитные импульсы тока и напряжения. Неизбежность этих импульсов обусловлена паразитными составляющими топологии преобразователя и токами рекуперации при выключении. Создать преобразователь, не имеющий данных импульсов, практически не представляется возможным, а вот спроектировать преобразователь, в котором эти импульсы будут приводить к выходам из строя, — в порядке вещей. Для защиты узлов схемы, в частности самих ключевых транзисторов, применяются снабберные цепи, в настоящее время ставшие необходимым атрибутом почти любого импульсного преобразователя.

Однако если разработчик решит заняться выбором и расчетом снаббера, он столкнется практически с нерешаемой задачей. Ведь снаббер — узел необходимый, обязанный присутствовать в преобразователе. Но как он должен выглядеть и как его посчитать — неизвестно. Нет даже теории адекватного расчета. Что же нужно знать для расчета номинала, например, конденсатора снаббера? Обязательно значение паразитной индуктивности. Эта индуктивность складывается из индуктивностей самого конденсатора, силового модуля, токоведущих шин, соединений, в расчет должны приниматься импеданс электролитических конденсаторов на частоте... (какой?), волновое сопротивление и т. д. И все это при длительностях импульса порядка десятков-сотен наносекунд.



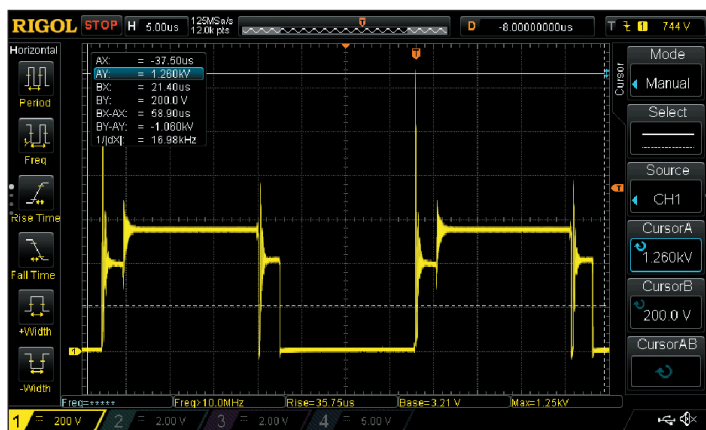


Рис. 3. Сигнал преобразователя

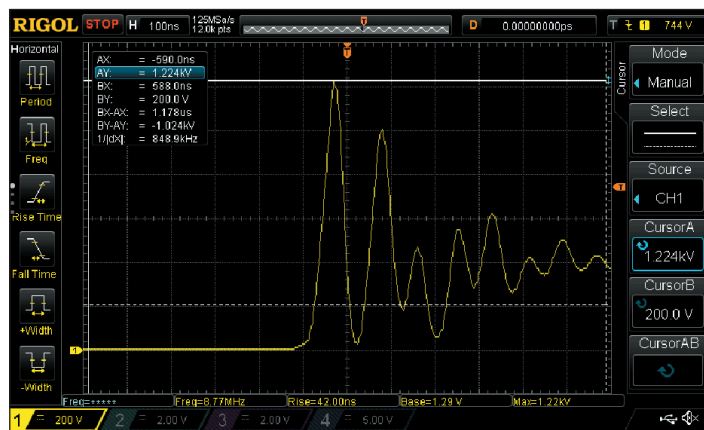


Рис. 4. Сигнал без снаббера

Не каждый специалист СВЧ-электроники, даже зная все исходные данные, сможет правильно все посчитать. Предлагается и другой теоретический способ — включить преобразователь без снабберов, измерить длительность и амплитуду выбросов напряжения и, исходя из этого, вывести значения паразитных емкостей/индуктивностей, после чего уже легко найти и искомые номиналы элементов снабберных цепей. Однако на практике этот способ неприменим: если включить подавляющее большинство преобразователей вообще без снабберов, они наверняка выйдут из строя даже при 10%-ной нагрузке, и измерять уже будет нечего. Следовательно, теория здесь не поможет. Обратимся к практике.

На практике употребляются самые разнообразные снабберы: C, RC, RCD, Z, RCZ и т. д. Пока опустим применение супрессоров (о них речь пойдет далее), тогда основные схемы снабберных цепей сводятся к вариантам, показанным на рис. 1, где а) C-снаббер, б) RC-снаббер, в) и г) два варианта относительно часто встречающихся RCD-снабберов. Если такие цепи ставятся не по питанию, а на каждом ключе инвертора, то, соответственно, получаем схемы, приведенные на рис. 2. Иные схемы фактически не применяются, а если и используются, то в эквивалентном написании все равно сводятся к указанным вариантам.

В качестве тестовой схемы использовался преобразователь, представляющий собой импульсный трансформатор, первичная обмотка которого включена в H-мост модуля интеллектуального инвертора M31-10-12Б4 с отключенными защитами. Нагрузка трансформатора — активная, постоянная, мощностью 0,5 кВт. Штатное коммутируемое напряжение преобразователя 550 В (выпрямленные трехфазные 380 В), средний ток 1,2 А. На осциллограмме рис. 3 видны временные характеристики, в частности «мертвое» время переключения. Далее на осциллограммах приводится фронт выключения нижнего ключа, то есть осциллограф подключен между эмиттером и коллектором одного из нижних ключей. Сигнал без каких-либо снабберов приведен на рис. 4.

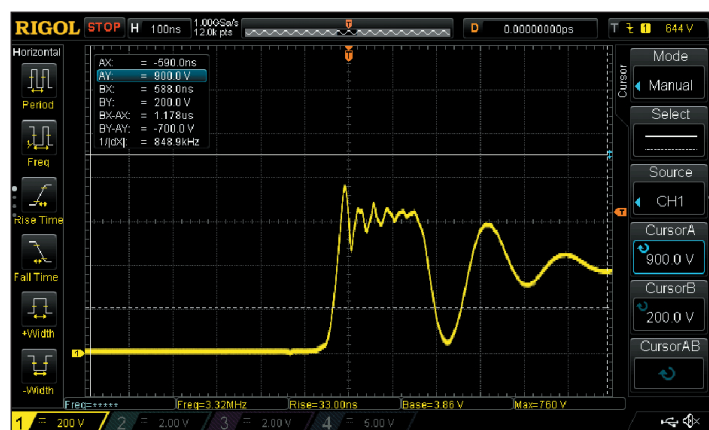


Рис. 5. C-снаббер 0,22 мкФ

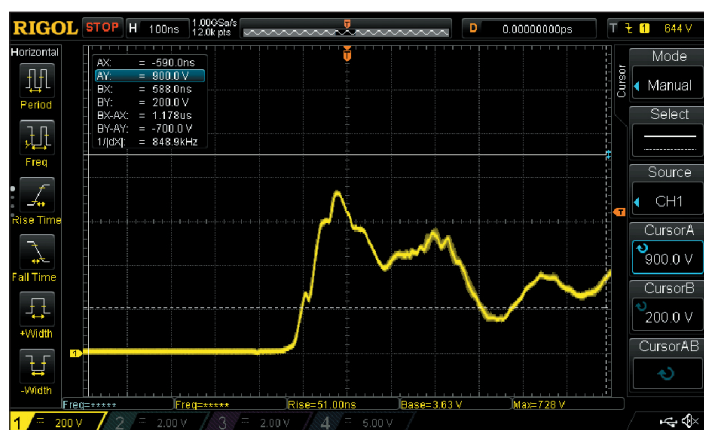


Рис. 6. 2C-снаббер 0,01 мкФ

На рис. 4 видно, что амплитуда обратного выброса превышает 1200 В при общей длительности импульса порядка 100 нс, что на практике недопустимо, так как очень велик риск выхода из строя транзисторов из-за потенциального пробоя коллектор-эмиттер. Далее применялись различные варианты снабберных цепей.

Наиболее простым вариантом представляется C-снаббер, особенно если он устанавливается не на каждом ключе, а только на шине питания. Такой вариант (конденсатор на шинах питания) изображен на осциллограмме рис. 5.

Как видим, длительность фронта выключения практически не увеличилась, а следовательно, значимо не увеличились и динамические потери ключа, но при этом амплитуда выброса уменьшилась до вполне приемлемых 800 В. Что, собственно, и требовалось от снаббера.

Если устанавливать конденсаторы не по питанию, а на каждом ключе (схема рис. 2а), то в контур рекуперации тока включается трансформатор, и его параметры, в том числе и параметры нагрузки трансформатора, начинают значительно влиять на картину выключения. На рис. 6 приведена осциллограмма выключения при установленных параллельно каждому ключу конденсаторах 0,01 мкФ.

Выключение на рис. 6 показывает избыточность емкости конденсаторов, поскольку выброс напряжения почти не уменьшился (относительно рис. 5), а длительность фронта выключения возросла почти в два раза. Но даже и так характер выключения мало отличается от выключения при установленном одном конденсаторе по питанию и фактически эквивалентен конденсатору порядка 0,47 мкФ, установленному по схеме рис. 1а.

Таким образом, конденсаторы на каждом ключе не дают преимущества в плане большей эффективности или иного характера выключения, «лучшей» защиты, зато данная схема имеет существенный недостаток в том, что работа снаббера начинает сильно зависеть от нагрузки инвертора, в отличие от одного конденсатора на шинах питания, где



Рис. 7. RC-снаббер 0,22 мкФ/1 Ом

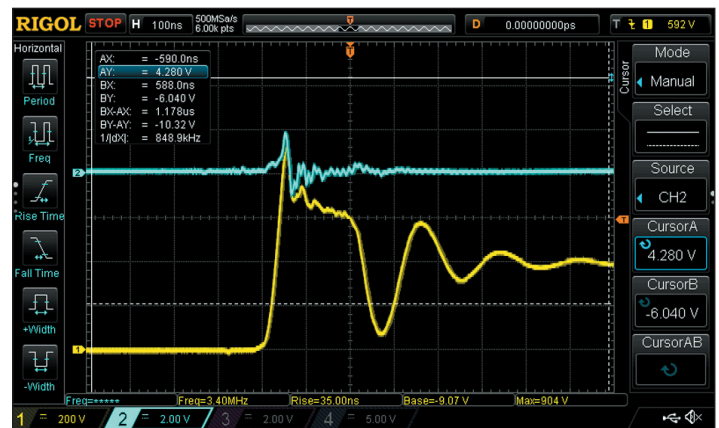


Рис. 8. RC-снаббер 0,22 мкФ/10 Ом

характеристики нагрузки на работе снаббера практически не сказываются.

То же самое следует сказать и о других схемах снабберов, устанавливаемых или на шинах питания, или на каждом ключе. Принципиальных различий в их работе и в том, и в другом включении нет. Вопрос только в номиналах; всегда можно подобрать такие номиналы, когда разница в работе одного и другого варианта практически не заметна. Как следствие, далее будут рассматриваться в основном более простые варианты подключения к шинам питания, а не на каждом ключе, что, повторимся, не принципиально.

Теперь обратим внимание на вариант RC-снаббера. На рис. 7–9 приведены сигналы выключения транзистора (канал 1) и ток снабберного конденсатора на токосъемном резисторе 0,1 Ом (канал 2).

На рис. 7, с резистором 1 Ом, видно, что ток конденсатора в пике достигает 43 А, однако малое сопротивление резистора не ухудшает защитные функции снаббера (сравните с рис. 5: выключение без резистора). Если резистор увеличивать (10 Ом на рис. 8 и 40 Ом на рис. 9), то снаббер начинает работать хуже: амплитуд выброса увеличивается с 700 до 900 В и далее до 1150 В. Однако уменьшается и импульсный ток конденсатора до 20 и 5 А соответственно.

Таким образом, как и следовало ожидать, единственная функция резистора в RC-снаббере — это снижение импульсной нагрузки на конденсатор за счет ухудшения защитной функции снаббера. Мнение, что RC-снаббер сродни RC-фильтру, где соотношение номиналов резистора и конденсатора собственно и определяет постоянную времени фильтра, категорически неверно. Всю «снабберную» функцию все равно продолжает выполнять только конденсатор, резистор же в этом смысле «вредит», но может быть в некоторой степени полезным для ограничения тока конденсатора. Однако нужно ли такое ограничение тока? При правильном выборе комплектации (об этом ниже) — нет; даже конденсаторы K73-17

номиналом 0,22 мкФ на 630 В (не говоря уже о специализированных снабберных конденсаторах) без ограничительного резистора успешно работают в преобразователях до десятков киловатт средней мощности и до сотен киловатт на запуске/останове двигателя. На практике выходы из строя не встречались, даже не встречался нагрев этого конденсатора. Возможно, резистор все-таки потребуется, если преобразователь с «приемкой 5», то есть импортные снабберы применять нельзя, а средняя мощность более 100 кВт, но это уже довольно специфическая задача, и ее решение к общим рекомендациям (о которых здесь и идет речь) не относится.

Еще более ошибочно мнение о RCD-снабберах. Указанные на рис. 1 и 2 RCD-снабберы действительно имеют право на существование, но применимы к биполярным транзисторам, тиристорам, к нагрузке и т. п., но не параллельно IGBT- или MOSFET-ключу. Хотя на практике нами не раз встречались именно такие схемы снабберов. Объясняется неправильность применения данных снабберных цепей наличием внутренних оппозитных диодов в IGBT- и MOSFET-транзисторах, которые сводят на нет диод собственно снаббера. Например, схема рис. 1в и 2в при включении практически не работает (снаббер шунтируется открытым каналом транзистора), а при выключении, поскольку диод снаббера блокирует обратный ток, работает как обычный RC-снаббер — таким образом, смысл диода в схеме теряется. Снабберы, показанные на рис. 1г и 2г, не работают вовсе, так как при выключении ток может протекать по двум путям: или через обратный диод транзистора, или через диод и резистор/конденсатор снаббера. Разумеется, ток потечет по пути наименьшего сопротивления, то есть через диод транзистора, а снаббер просто остается незадействованным. Осциллограммы работы таких снабберов отдельно приводиться не будут, ведь они один в один повторяют осциллограммы рис. 8 и 2 соответственно.

Отдельно следует сказать об активном ограничении напряжения снаббера супрессором или варистором. Такие схемы пред-

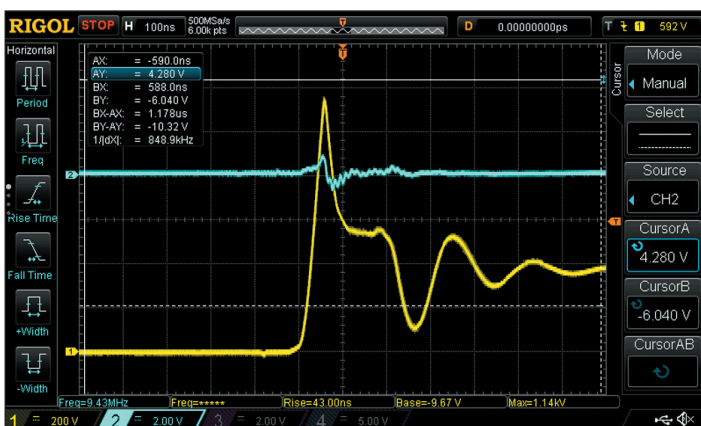


Рис. 9. RC-снаббер 0,22 мкФ/40 Ом

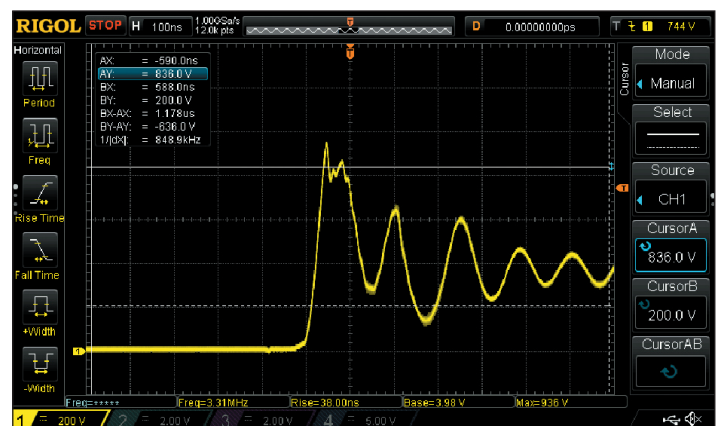


Рис. 10. Ограничение напряжения супрессором на 800 В

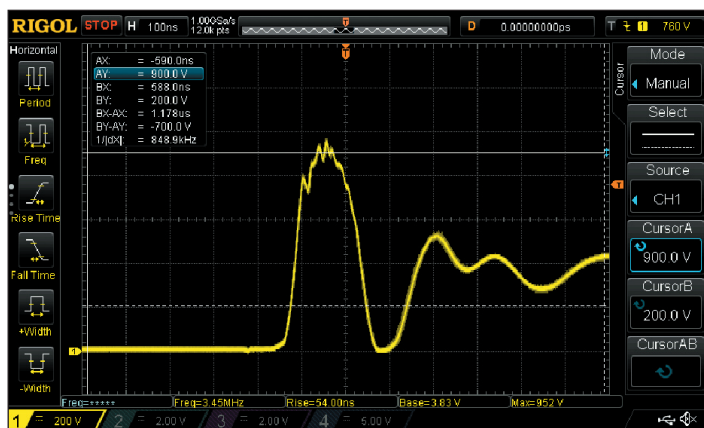


Рис. 11. Ограничение напряжения варистором на 800 В

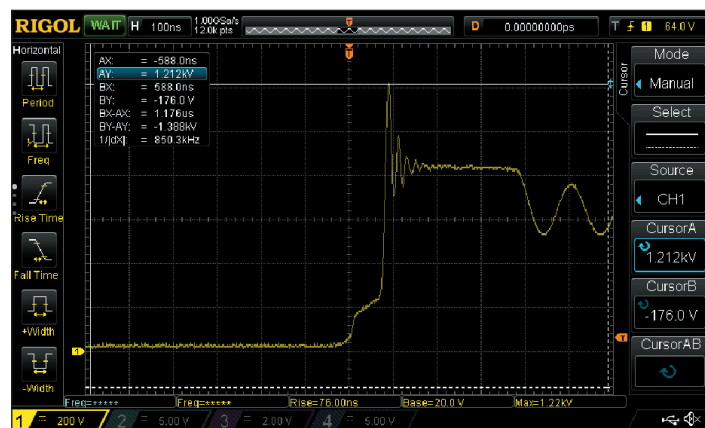


Рис. 12. Ограничение напряжения супрессором на 800 В

ставляют собой ограничитель (супрессор/варистор), установленный либо также на шинах питания, либо параллельно каждому ключу. Зачастую последовательно им ставят резисторы, чтобы ограничить ток импульса, но это, как и в случае с вышеописанным RC-снаббером, категорически неправильно, поскольку неминуемо приводит к ухудшению защитных функций цепи.

На рис. 10 и 11 приведены импульсы выключения без конденсаторов (изменения относительно рис. 2) для супрессора и варистора соответственно.

Как видим из рисунков, принципиальных различий нет, кроме явно большей собственной емкости варистора относительно супрессора, емкость которого измеряется пикофарадами или в худшем случае десятками пикофард. Однако супрессор для транзисторных инверторов в большей степени предпочтителен, в то время как варистор чаще используется в тиристорных схемах. Объясняется это нагрузочными и временными характеристиками: для транзисторных преобразователей критично быстроедействие, оно должно составлять не более десятков наносекунд, но и длительность работы супрессора редко превышает сотни наносекунд, то есть импульсная мощность относительно небольшая. Для тиристорных преобразователей такое быстроедействие не нужно, зато критична импульсная мощность защитного элемента, так как время воздействия на него может исчисляться микросекундами.

Задержка срабатывания супрессора наглядно показана на рис. 12. Здесь приведено выключение транзистора в схеме нижнего ключа на активно индуктивную нагрузку; режим одиночного импульса.

В тестовой схеме рис. 12 также отсутствуют снабберные конденсаторы. Очень хорошо видна полка ограничения на уровне 820 В, однако перед нею столь же хорошо виден импульс, возникший из-за задержки срабатывания супрессора. Время задержки — порядка 10–20 нс, амплитуда выброса за это время достигает 1200 В, что недопустимо для транзистора 12-го класса. Именно поэтому супрессоры «в чистом виде» применяются редко; параллельно им почти всегда ставят все те же C- или RC-снабберы.

Итак, какая схема снаббера предпочтительна?

Применение RCD-снабберов, показанных на рис. 1 и 2, перешло в область инверторов на транзисторах с полевым управлением из преобразователей на основе тиристорных и биполярных транзисторов и в виде защитного элемента собственно транзистора неприменимо в принципе.

RC-снабберы не лучше простого C-снаббера (поскольку это не RC-фильтр); резистор только ухудшает его функции и для пленочных, тем более специализированных снабберных конденсаторов не нужен. В тиристорных преобразователях — да, резистор зачастую необходим, здесь мощность импульса значительно больше, но в транзисторных — нет, за исключением разве что уникальных изделий.

C-снаббер, устанавливаемый на каждом ключе, ничем не превосходит одиночный конденсатор, установленный на шинах питания, преимуществ в такой схеме нет. Но есть минусы: зависимость

номинала конденсатора от нагрузки, что значительно усложняет расчет схемы, а значит, снижает и надежность.

Для защиты от перенапряжения необходимо и использование активного ограничителя — супрессора, устанавливаемого аналогично между шинами питания.

Таким образом, наилучший снаббер — это установленные между «+U» и «-U» конденсатор и параллельно ему последовательная сборка (до нужного напряжения) супрессоров. Если полумосты по топологии разнесены (например, несколько полумостов в отдельных модулях), такая сборка ставится на каждом полумосте. Если сборка инвертора в одном корпусе, то устанавливается один снаббер. Все прочие схемы избыточны и в конечном счете, кроме ухудшения защитных функций и усложнения конструкции, ничего не приносят.

Тип конденсатора — обязательно пленочный K73-17 или K78-2; керамические конденсаторы, а тем более чип-конденсаторы категорически не подходят. Причина тому не в паразитных составляющих данных типов конденсаторов (это мнение распространено, но ошибочно), а просто в большей устойчивости пленочных конденсаторов к импульсной перегрузке. Специализированные снабберные конденсаторы (например, серии B32682–B32686 от Epcos и т. п.) фактически представляют собой все тот же пленочный K73-17, только побольше и с выводами потолще (для уменьшения индуктивности); принципиальных отличий нет.

Номинал конденсатора составляет 0,1–0,33 мкФ, в подавляющем большинстве случаев 0,22 мкФ. Большие или меньшие номиналы, конечно, применяются, но гораздо реже и «по месту», например при очень мощных обратных выбросах, в преобразователях на частоту 200 кГц и т. п. В этом, к слову, еще одно преимущество данной схемы снаббера: номинал не зависит от характеристик нагрузки, конденсатор никак не привязан к фазным выходам. Сродни конденсаторам, устанавливаемым по питанию микросхем: в любых схемах, старых и новых, СВЧ и DC, любые микросхемы, почти всегда 0,1 мкФ. Аналогично и здесь: почти всегда 0,22 мкФ.

Так как же должен выглядеть оптимальный снаббер, по крайней мере для первого включения преобразователя? Пленочный конденсатор по питанию инвертора 0,22 мкФ и параллельно ему супрессор. Если силовых модулей несколько, то ставится на каждый полумост по такой сборке. Все. Доказательством такого подхода служит опыт производителей силовых блоков инверторов, таких как Powerex, APS, Infineon. Во всех этих силовых инверторах применяются полумосты в «стандартном» конструктиве 62 мм, и на каждом полумосте стоит один конденсатор по питанию типа B32686 емкостью 0,22 мкФ и параллельно ему супрессоры. Другие схемы не применяются. Автор по крайней мере других вариантов не встречал. А это преобразователи, заметьте, работающие со всевозможной нагрузкой, в различных применениях, мощностью до десятков и сотен киловатт. И тогда что уж говорить о типовом инверторе на пару-тройку киловатт? Отсюда и утверждение: «снаббер — это просто»!