

И волки сыты, и овцы целы.

Комбинированный метод защиты преобразователей от пусковых сверхтоков и подавления высокочастотных гармоник

В статье приведен анализ классических методов защиты от пусковых сверхтоков на входе статических преобразователей электроэнергии и рекомендован простой метод защиты, основанный на использовании серийно выпускаемых дросселей подавления высокочастотных помех фирмы Elhand.

Борис Семенов

borka@mail.ru

В составе высокочастотных преобразователей для систем электроснабжения, питаемых от сетей однофазного переменного тока 220 В, 50 Гц и трехфазного переменного тока 380 В, 50 Гц, традиционно используется входное звено, осуществляющее преобразование переменного сетевого напряжения в постоянное, которое затем трансформируется посредством управляемого высокочастотного звена в переменное напряжение импульсной формы. С момента появления высокочастотных преобразователей входное звено по своему схемотехническому построению не претерпело существенных изменений: традиционно оно представляет собой каскадное соединение выпрямителя (мостового или трехфазного) и сглаживающего фильтра емкостного или индуктивно-емкостного характера. Разработка таких схем, что называется, «в лоб» может привести к появлению зарядных сверхтоков, во много раз превышающих рабочие токи потребления. Поэтому разработчики применяют схемотехнические меры разной степени сложности для полного исключения пусковых сверхтоков или их снижения до безопасных значений.

В случае маломощных высокочастотных преобразователей (мощностью до 200–300 Вт) входное звено, питаемое от однофазной сети, строится по хорошо известной типовой схеме, показанной на рис. 1.

Переменное напряжение 220 В, 50 Гц здесь выпрямляется диодным мостом VD1...VD4, пульсации выпрямленного напряжения сглаживаются емкостным фильтром на основе конденсатора С. Поскольку включение преобразователя в питающую сеть может произойти не только в момент, когда сетевое на-

пряжение близко к нулевому, но и на его амплитуде, зарядный ток конденсатора С может легко вывести из строя диодный мост, то есть вызвать эффект токового пробоя, если не приняты меры по ограничению этого сверхтока. Понятно, что ограничение зарядного тока в условиях близкого к нулевому импеданса конденсатора С может происходить только за счет активного сопротивления токоведущих проводников (которое мало). Чтобы исключить возникновение аварийного режима, в состав входного звена вводится резистор R с небольшим сопротивлением, ограничивающий зарядный ток. Эта защита широко используется в промышленной аппаратуре даже несмотря на то, что в рабочем режиме резистор R рассеивает тепловую энергию, а значит, немного снижает КПД преобразователя. Методы расчета номинала резистора R хорошо известны [1], поэтому за подробностями можно обратиться к соответствующей литературе.

КПД схемы, показанной на рис. 1, можно повысить, если применить вместо линейного резистора R нелинейный термистор, сопротивление которого меняется в зависимости от температуры. Что дает применение термистора? При первоначальном пуске токовый импульс разогревает термистор, и его сопротивление резко возрастает, обеспечивая снижение пускового тока. В установившемся режиме потребления тока термистор восстанавливает свое малое сопротивление (охлаждается), и тепловые потери уменьшаются.

При разработке мощной преобразовательной техники существенной становится проблема отвода выделяемого тепла, поэтому разработчики стремятся максимально снизить тепловыделение, зачастую — ценой значительного усложнения схемы построения. Соответственно, описанные выше методы снижения пусковых токов здесь модифицируются. Рассмотрим их подробнее.

На рис. 2 приведена модифицированная схема ограничения пусковых сверхтоков, часто применяемая в составе преобразователей с номинальной мощностью более 1 кВт. Как видно из схемы, в составе звена имеется знакомый ограничительный резистор

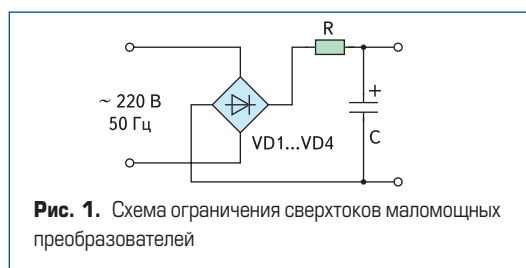


Рис. 1. Схема ограничения сверхтоков маломощных преобразователей

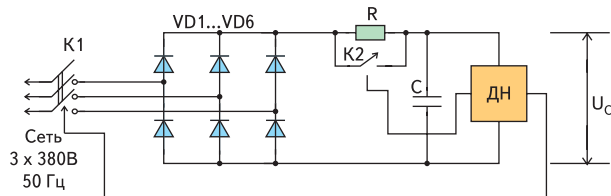


Рис. 2. Модифицированная схема ограничения пусковых сверхтоков

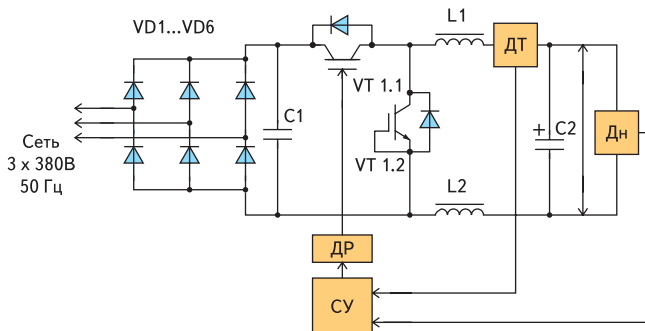


Рис. 3. Схема ограничения сверхтоков, использованная при разработке преобразователя постоянного тока мощностью 12 кВт

R. Но кроме этого, также введены дополнительные элементы:

- контактор K1 подачи сетевого напряжения 380 В, 50 Гц;
- реле K2, шунтирующее токоограничительный резистор R;
- датчик контроля выходного напряжения ДН.

При первоначальном включении замыкается контактор K1 и конденсатор C заряжается через резистор R. При этом величина напряжения U_c на конденсаторе C контролируется датчиком напряжения ДН. Когда напряжение U_c достигает величины, необходимой для запуска звена высокочастотного инвертора, замыкается реле K2, шунтируя резистор R, что обеспечивает снижение тепловых потерь в установившемся режиме работы.

Каковы недостатки данной схемы? Во-первых, в состав звена вводятся контакторы и реле с мощными контактами, которые должны допускать прохождение тока не ниже номинального потребляемого. Во-вторых, появляется дополнительная электронная схема на основе датчика напряжения ДН, которая должна алгоритмически обрабатывать задачу пуска и принимать решения об отключении контактора K1, если напряжение на конденсаторе C не достигнет требуемой величины за заданное время или в процессе работы произошло снижение питающего напряжения. Кроме того, электронная схема должна обеспечить задержку повторного пуска после отключения преобразователя. В противном случае преобразователь может выйти в режим питания с разомкнутым реле K2, а это однозначно приведет к недопустимому разогреву токоограничительного резистора R. Тем не менее описанная схема в авторском варианте использована при разработке статического преобразователя трехфазного напряжения 380 В, 50 Гц в трехфазное напряжение 220 В, 400 Гц мощностью 6 кВт. В процессе пятилетней эксплуатации узел

ни разу не отказал и зарекомендовал себя с лучшей стороны.

Более сложная (и более эффективная) схема ограничения сверхтоков, использованная при разработке преобразователя постоянного тока мощностью 12 кВт, приведена на рис. 3.

Эта схема ограничения сверхтоков кардинальным образом отличается от описанных выше, так как построена на основе чопперного регулятора напряжения [1]. В ней используется IGBT-сборка VT1 типа CM200DY-24A (производитель — Mitsubishi) со встроенными ультрабыстрыми диодами. Дроссели L1, L2 и конденсатор C2 образуют фильтр пульсаций выпрямленного напряжения. Конденсатор C1 защищает схему от выбросов напряжения при работе. Кроме того, в схеме имеются:

- датчик тока ДТ типа LA55P (производитель — «Твелем»);
- датчик напряжения ДН типа LV25P (производитель — «Твелем»);
- драйвер ДР управления «верхним» транзистором IGBT-сборки;
- схема управления СУ.

В момент включения преобразователя в сеть транзистор VT1.1 переводится в проводящее состояние, начинается заряд конденсатора C2. При достижении пускового тока установленного значения схема управления СУ прерывает зарядный ток, ток снижается, затем процесс включения/отключения транзистора VT1.1 повторяется до срабатывания датчика напряжения ДН, свидетельствующего о достижении напряжения на конденсаторе C2 заданного уровня. Датчик ДН блокирует транзистор VT1.1 в открытом состоянии, и далее происходит запуск высокочастотного инвертора.

Главное достоинство этой схемы очевидно: с ее помощью можно достичь значения пускового тока, не превышающего значения потребляемого номинального тока в установившемся режиме работы (естественно, за счет увеличения времени заряда конденсатора C2).

К сожалению, и данное схемотехническое решение оказалось достаточно сложным с точки зрения реализации: в состав преобразователя пришлось ввести ряд сложных функциональных узлов, которые используются преимущественно в момент первоначального пуска и в дальнейшем не несут функциональной нагрузки. Кроме этого, схема по рис. 3 в процессе эксплуатации показала себя гораздо менее надежной, чем схема по рис. 2.

Пристально взглянув на другие элементы входного звена преобразователя, автор статьи попытался найти их скрытые возможности по обеспечению ограничения сверхтоков. Как ему это удалось, будет рассказано далее.

Обратимся к рис. 4, на котором состав входного звена мощного преобразователя обозначен подробнее. Здесь имеется, во-первых, сетевая дроссель L1, ограничивающий распространение в питающую сеть гармоник, возникающих при работе высокочастотного инвертора, а также гасящий коммутационные перенапряжения. Также в составе силовой схемы предусмотрен помехоподавляющий фильтр ППФ модульного исполнения, задерживающий высшие гармоники помех. Элементы фильтра подавления пульсаций выпрямленного напряжения L2, С нам уже знакомы.

Использовать ППФ в качестве ограничителя пусковых токов не получится, так как эта функция ему не свойственна, а вот близкие к этой задаче функции выполняют дроссели L1 и L2. Их, как оказалось, можно «нагрузить».

Здесь необходимо сделать небольшое отступление и сказать несколько добрых слов в адрес сетевых дросселей, выпускаемых фирмой Elhand [2]. Внешний вид наиболее интересных в данном случае типов дросселей показан на рис. 5.

Почему — сетевые дроссели? Зачем они нужны? Дело в том, что питающее сетевое напряжение подвержено искажениям под влиянием работы высокочастотных преобразователей, потребляющих ток от сети в импульсном режиме и создающих высокочастотные помехи. Сетевые дроссели гасят эти помехи и снижают риск попадания гармоник в питающую сеть. Более того, если в качестве силовых ключей используются тиристоры, сетевые дроссели гарантированно обеспечивают защиту от лавинного нарастания тока их проводимости до момента переключения [3].

Выбрать соответствующий дроссель фирмы Elhand для установки в разрабатываемый преобразователь достаточно просто. Главным условием выбора является соотношение индуктивности подводящих проводников питающей сети L_s и индуктивности дросселя L_d :

$$L_d \geq \frac{U_T}{(di_T/dt)} - L_s,$$

где U_T — величина напряжения на силовом приборе в момент его переключения, В; di_T/dt — крутизна нарастания тока проводимости силового прибора, А/с; L_s — индуктивность подводящих проводников питающей сети.

Оценить параметры U_T и di_T/dt в случае использования IGBT-приборов несложно — эти данные можно получить из анализа величины выпрямленного питающего напряжения, а также скорости нарастания тока при переключении, который определяется характером нагрузки преобразователя (активная, индуктивная, комбинированная) и скоростью коммутации IGBT-прибора.

Оценить значение L_s сложнее, так как неизвестно заранее, какой длины окажутся питающие проводники, какова будет их конфигурация. Поэтому фирма Elhand рекомендует в любом случае устанавливать сетевую дроссель, ориентируясь на величину потребляемого от сети тока. С этой целью, для облегчения выбора, специалисты Elhand разработали типовой ряд трехфазных дросселей ED3N. Некоторые типонималы этого ряда приведены в таблице 1.

Таблица 1. Некоторые типонималы дросселей ED3N

Тип	Параметры, мГн/А	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Масса, кг
ED3N	8,5/3,3	125	85	105	2,3
	0,5/70	230	170	200	18
	0,15/150	240	190	207	24
	0,05/400	340	200	295	47
	0,03/800	360	245	360	78

Основным проектировочным критерием здесь является допустимое падение напряжения на дросселе в нагруженном состоянии, которое не должно превышать нескольких процентов от номинального напряжения сети:

$$U_L = 2\pi f L_d i,$$

где U_L — падение напряжения на дросселе; f — частота напряжения сети; L_d — проектная индуктивность дросселя; i — номинальный ток обмотки дросселя.

Следует отметить, что фирма Elhand выпускает также моторные трехфазные дроссели ряда ED3S, предназначенные для обеспечения непрерывности протекания тока в об-

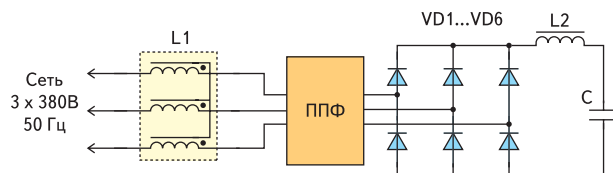


Рис. 4. Входное звено мощных преобразователей

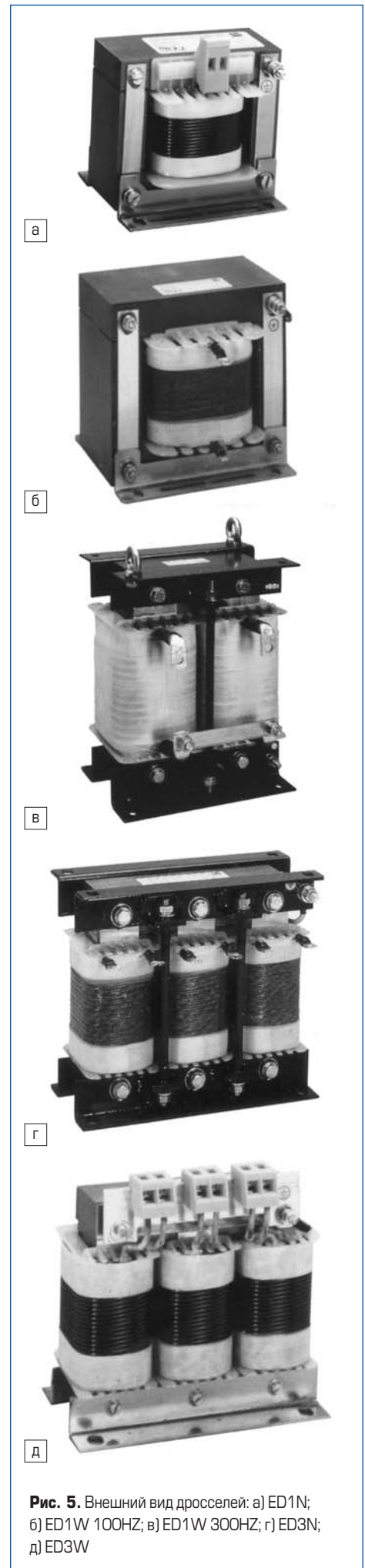


Рис. 5. Внешний вид дросселей: а) ED1N; б) ED1W 100HZ; в) ED1W 300HZ; г) ED3N; д) ED3W

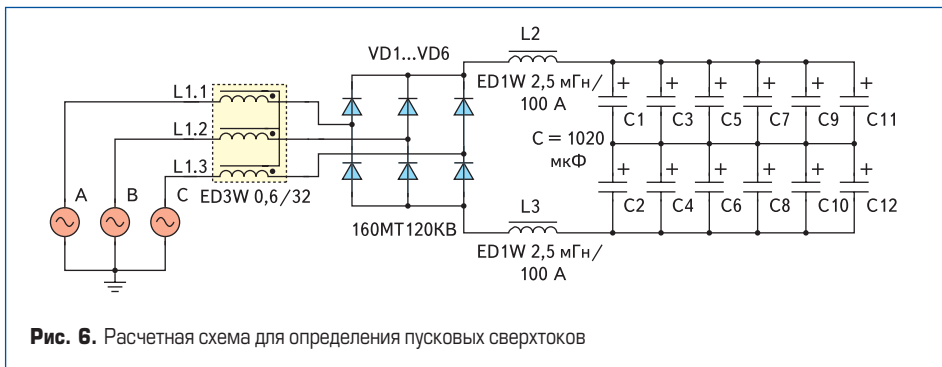


Рис. 6. Расчетная схема для определения пусковых сверхтоков

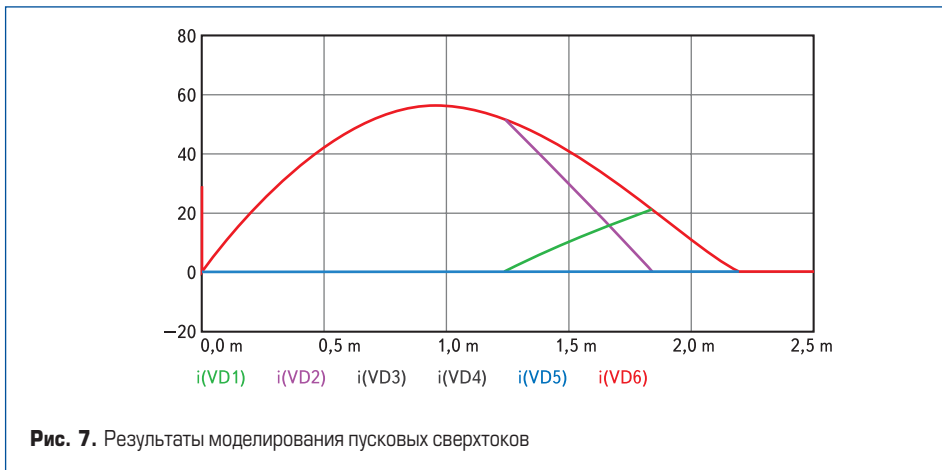


Рис. 7. Результаты моделирования пусковых сверхтоков

мощных двигателей [4], а также однофазные дроссели компенсации гармоник частоты 100 Гц и 300 Гц типа ED1N и ED1W. Трехфазные моторные дроссели типа ED3S в принципе можно использовать в качестве сетевых, а однофазные типа ED1N и ED1W — в качестве сглаживающих элементов сетевых LC-фильтров.

Конечно, дроссели как таковые являются достаточно тривиальными элементами, которые можно изготавливать в условиях даже небольших производственных фирм. Почему же все-таки рекомендуется ориентироваться на покупные изделия? Ответ прост. Действительно, теоретически разработать и изготовить дроссель несложно. Однако не будем забывать о трудозатратах на изготовление, о технологической стороне вопроса, о длительных сроках эксплуатации преобразовательной техники, которая зачастую вынуждена функционировать в жестких климатических и механических условиях среды. Дроссели фирмы Elhand полностью отвечают этим требованиям: они производятся специализированной фирмой, имеют низкую стоимость, механически прочны, пропитаны вакуумным способом (что позволяет сохранить высокое сопротивление изоляции в условиях повышенной влажности), оснащаются удобными для монтажа клеммами, оптимизированы по габаритам. К сожалению, полные отечественные аналоги таких дросселей отсутствуют, что удручает разработчиков преобразовательной спецтехники.

Но вернемся к вопросу использования сетевых дросселей Elhand для ограничения пусковых токов. Автором статьи с помощью компьютерного моделирования в пакете MicroCap 7.0 была проанализирована реальная схема входной части статического преобразователя

мощностью 12 кВт, с сетевым дросселем ED3N и дросселями подавления пульсации 300 Гц типа ED1W, показанная на рис. 6.

Дроссель L1 — сетевой, дроссели L2 и L3 входят в состав LC-фильтра. Диодный мост типа 160MT120KB (производитель — IR), емкостная часть фильтра составлена из 12 конденсаторов типа B43586-A5687-Q (производитель — Epcos) с эквивалентной емкостью 1020 мкФ. Фильтр радиопомех, в силу его незначительного влияния на процесс ограничения сверхтоков, из модели исключен.

Результаты моделирования показаны на рис. 7. Из представленного графика видно, что пусковой ток, протекающий через диоды VD1...VD6, не превышает допустимого для диодов, а переходный процесс длится не более 10 мс, что не приведет к срабатыванию установленного на входе преобразователя автоматического выключателя типа АК-50Б с номинальным током 25 А и установкой 12I.

Таким образом, сетевой дроссель L1 выполняет две функции: в момент включения он совместно с дросселями L2 и L3 защищает диодный мост от возникновения сверхтоков, а в режиме продолжительной работы осуществляет подавление высокочастотных гармоник.

Литература

1. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. М.: Солон-Пресс. 2005.
2. www.elhand.com.pl
3. Лукевски М. Сетевые дроссели Elhand / www.elhand.com.pl
4. Лукевски М. Моторные дроссели Elhand / www.elhand.com.pl