

# Защита от сверхмощных кондуктивных ЭМИ,

## коммутационных перенапряжений и сверхтоков транспортного электрооборудования с сетевым питанием

**В статье анализируются традиционные и предлагаются модернизированные средства защиты от сверхмощных кондуктивных электромагнитных импульсов (молнии, ядерного взрыва и т. п.), коммутационных перенапряжений и сверхтоков (коротких замыканий и перегрузок) транспортного электрооборудования с питанием от сети постоянного тока.**

**Владимир Булеков,**  
д. т. н.  
**Станислав Резников,**  
д. т. н.  
**Александр Милославский**

rezn@formatek.ru

### Традиционные средства защиты

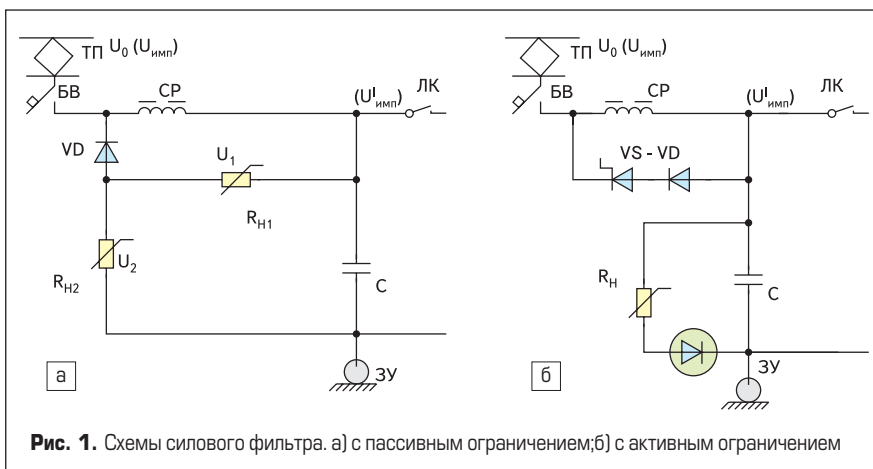
*Защита от контактно-коммутационных кратковременных импульсов напряжения (КИН) и сверхтоков*

**Силовой фильтр с пассивным ограничением**

На рис. 1а приведена схема силового фильтра (СФ) с пассивным ограничением напряжения, содержащая силовой реактор (СР), конденсаторную батарею (С), обратный диод (VD) и два варистора ( $R_{H1}$ ,  $R_{H2}$ ). Напряжение стабилизации первого варистора ( $R_{H1}$ ) выбирается выше максимальной ЭДС самоиндукции СР, возникающей из-за пульсаций сетевого тока питания. Суммарное напряжение стабилизации  $R_{H1}$  и  $R_{H2}$  определяется выбором допустимого выходного импульсного напряжения  $U'_{имп}$  при коммутациях в сети (например, при аварийном выключении БВ в соседних моторных секциях).

К недостаткам такого фильтра относятся следующие:

- ограниченное число мощных импульсов тока варисторов;
- постоянные тепловые потери в варисторах, сильно зависящие от выбираемого диапазона стабилизации напряжения.



Следует также указать на часто проявляемый конструктивный недостаток силового реактора с магнитным сердечником: емкостной пробой изоляции первых со стороны сети нескольких витков на корпус и сердечник при воздействии высоковольтного КИН.

**Силовой фильтр с активным ограничением**

На рис. 1б приведена схема СФ с активным ограничением напряжения. В этой схеме используются однооперационный обратный тиристор (VS) и запираемый тиристор (ЗТ), благодаря которым вышеуказанные недостатки существенно снижены. Однако надежность такой схемы сильно ограничивается возможным пробоем тиристоров при молниевом электромагнитном импульсе.

**Стабилизация напряжения дуги в дугогасительных камерах выключателей и повышение их быстродействия**

В [1, 2] убедительно доказано, что для повышения эффективности (быстродействия и надежности) дугогасительных камер контакторов и аварийных быстродействующих выключателей постоянного тока необходимо максимально стабилизировать напряжение дуги. Для этого предложено усилить интенсивность магнитного дутья, использовать дополнительные внешние шины, вытягивающие и стабилизирующие дугу, а также профилированную деионизирующую решетку [3, 4]. Вместе с повышением эффективности дугогасительных камер эти способы помогают существенно снизить амплитуду коммутационных сетевых импульсов (например, с 13 до 9–10 кВ).

Дальнейшее снижение указанной амплитуды предложено достичь при помощи форсирования процесса расщепления контактов и использования системы ранней диагностики утечек тока в изоляции, перегрузок и коротких замыканий [2, 5, 6].

Принимая во внимание указанные способы модернизации, следует констатировать сохранение одного из существенных недостатков выключателей: относительно большое время вытягивания дуги (порядка 10 мс и более). Это приводит к завышению амплитуды коммутационного импульса (для компенсации вольт-секундного интеграла).

### Схемы бездугового расцепления и устройства разгрузки контакторов

Под схемами бездугового расцепления обычно понимаются комбинированные, либо параллельные, либо последовательные электрохимический и полупроводниковый (п/п) выключатели, первым из которых выключается полупроводниковый. Параллельная комбинация в аспекте повышения скорости выключения имеет смысл только при условии импульсного форсирования процесса предварительного расщепления контактов перед выключением п/п ключа. При последовательной комбинации относительно велики статические тепловые потери, однако достигается гальваническая развязка цепей питания и нагрузки [7]. Возможна также комбинация с одним п/п ключом и двумя контакторами — последовательным и параллельным.

Все три перечисленных варианта применительно к мощным цепям повышенного постоянного напряжения используются только при шунтировании п/п ключа (GTO, GCT, IGCT или IGBT) специальным мощным термоударным резистивным (или дуговым) рассеивателем [7]. При этом число рабочих циклов (до разрушения) такого рассеивателя, как правило, сильно ограничено, даже если не требовать от него нелинейной (стабилизирующей) вольт-амперной характеристики.

Устройства разгрузки контакторов обычно представляют собой обратные диодные или тиристорные цепочки, шунтирующие цепи с индуктивностью (дроссельные, дроссельно-резистивные или индуктивно-электродвигательные). Иногда такое шунтирование требует установки дополнительных развязывающих силовых диодов или защитных быстродействующих контакторов для исключения обратных токов по вышеуказанным цепочкам.

Шунтирование диодно-тиристорной цепочкой индуктивно-электродвигательной цепи практически не приводит к разгрузке линейных контакторов и БВ, так как при существующей ЭДС двигателей указанная цепочка заперта. Поэтому более эффективным является шунтирование индуктивных цепей. Следует, однако, заметить, что индуктивность питающей цепи  $L_{\text{сети}}$  всегда при этом приводит к выделению дополнительной энергии в дуге контактора.

### Специфика защиты от сверхмощных кондуктивных ЭМИ: молний, пробоев, ядерных взрывов и т. п.

Основным средством защиты от сверхмощных кондуктивных (проводных) электромагнитных импульсов (ЭМИ) в питающей железнодорожной сети являются так называемые разрядники, представляющие собой последовательные нелинейно-разрядные устройства [1].

На российских электровозах и электропоездах постоянного тока распространение получили биполярные (обратимые) вилитовые

разрядники (рис. 2), в которых последовательно с вилитовым сопротивлением ( $R_B$ ) включены два искровых промежутка (ИП<sub>1,2</sub>), заключенные в щелевые дугогасительные камеры. Возникающая на искровых промежутках дуга гасится в камерах под действием магнитного поля ( $B^\wedge$ ), создаваемого постоянными дисковыми магнитами. Искровые промежутки шунтированы многоомяными тирвитовыми сопротивлениями  $R_{\text{ш}}$ . С увеличением импульсного тока сопротивление вилита падает, согласно приближенной вольт-амперной характеристике  $U \sim Ci^{0,3}$ , что обеспечивает ограничение импульсной волны перенапряжения. После прохождения волны сопротивление вилитовых дисков возрастает до 150–160 Ом и ток падает до 25–30 А. При этом дуги на ИП<sub>1,2</sub> растягиваются под действием магнитного поля и разрываются. Если импульс (например, от молнии) имеет противоположную полярность, то меняется направление выдувания дуг в камерах, как показано на рис. 2 штриховыми линиями, но способность гасить сопровождающий ток сохраняется.

Указанный разрядник (типа РМБВ-3,3) имеет относительно малую пропускную способность (энергию импульса) вилитовых дисков, что иногда приводит к их перегреву и пробоем при воздействии мощных коммутационных перенапряжений (система дугогашения относительно слаба). Другой разрядник (типа РВПК-ЦНИИ), разработанный на основе тирвитовых дисков, имеет большую пропускную способность и более мощную систему дугогашения.

Амплитуда ЭМИ определяется установкой разрядника, то есть величиной пробивного напряжения ИП и стабильностью этой установки, на которую существенно влияет состояние поверхностей электродов ИП, температура и влажность воздуха. Нестабильность установки заставляет выбирать ее со значительным превышением над наибольшим напряжением защищаемой цепи, иначе его ресурс (например, 30 номинальных по энергии импульсов) быстро израсходуется.

Вышеуказанный недостаток делает рассмотренные неуправляемые разрядники практи-

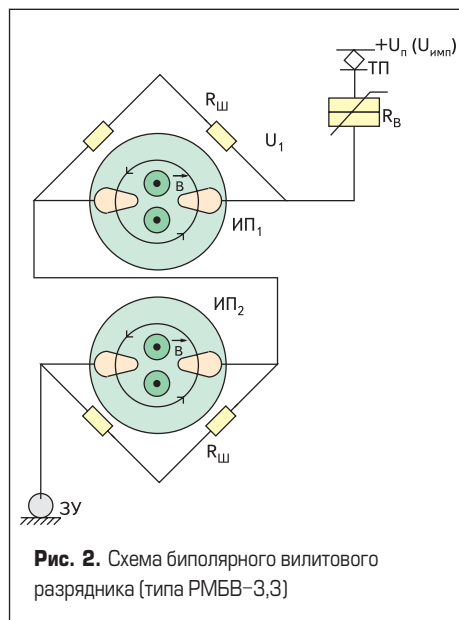


Рис. 2. Схема биполярного вилитового разрядника (типа РМБВ-3,3)

чески не совместимыми с силовыми тяговыми полупроводниковыми преобразователями, требующими более точного ограничения по импульсному напряжению. Радикальным универсальным способом защиты и от контактно-коммутационных КИН, и от мощных кондуктивных ЭМИ является оптимальное сочетание силового фильтра с повышенными требованиями к «паразитно-дуальным» параметрам его пассивной части:

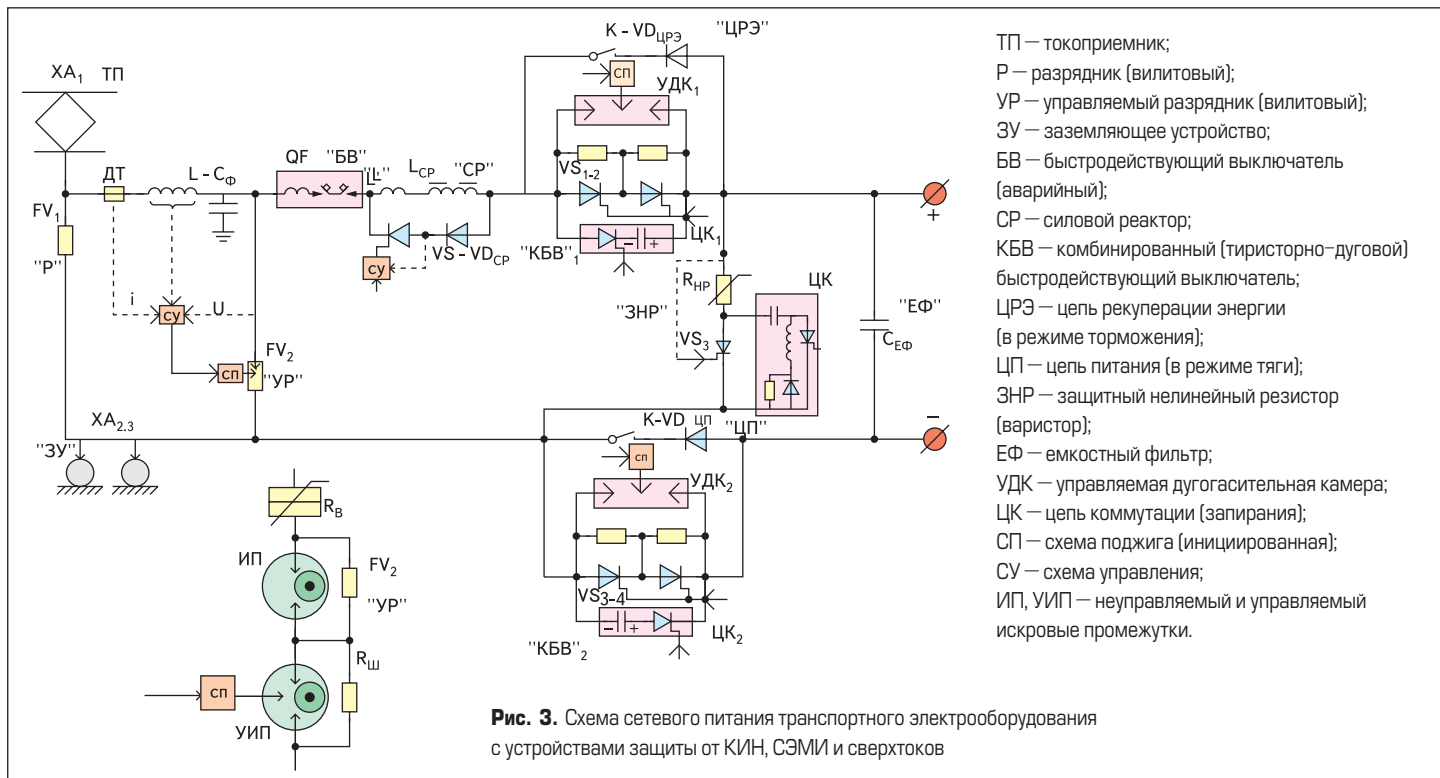
$$C_{\text{паразL}} = 0, L_{\text{паразC}} = 0$$

и последовательного нелинейно-разрядного устройства с управляемым разрядником или электронным ключом (со схемой управления по напряжению  $U$  и его производной  $dU/dt$ ). Разрядные устройства различных типов для разрядки емкостных накопителей широко освещены в литературе. Однако все они трудно применимы в случае питания от высоковольтной сети в сочетании с нелинейным ограничителем напряжения типа вилитового, варисторного, полупроводникового и т. п. из-за отсутствия в них устройства дугогашения или активного запирающего. Поэтому необходимо рассматривать возможные варианты их применения только в совокупности с дугогасительным или запирающим устройством.

### Модернизация средств защиты от контактно-коммутационных КИН, сверхмощных кондуктивных ЭМИ и сверхтоков

На рис. 3 приведена схема сетевого питания транспортного электрооборудования с комплексом устройств защиты от контактно-коммутационных кратковременных импульсов напряжения (КИН), сверхмощных кондуктивных электромагнитных импульсов (СЭМИ) и сверхтоков (КЗ и перегрузок).

Для повышения эффективности (точности и надежности) защиты от СЭМИ (молнии, ядерных взрывов и т. п.) предложено заменить один из двух обычно применяемых неуправляемых вилитовых разрядников (Р) на управляемый (УР), схема которого выделена на рис. 3. Помимо традиционно применяемых в его составе вилитовых шайб ( $K_B$ ) и неуправляемого искрового промежутка (ИП) введен управляемый с помощью высоковольтной схемы поджига (СП) искровой промежуток (УИП), также содержащий постоянные магниты для обеспечения дугогашения путем магнитного «дутья» (показан вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ ). Сигнал на вход схемы поджига (СП) поступает от схемы управления (СУ), которая ведет обработку информации от датчиков тока (ДТ), его производной ( $dI/dt$ ), снимаемой с индуктивности фильтра, и напряжения ( $U(t)$ ). Благодаря указанной управляемости удается приблизить уровень ограничения перенапряжения от СЭМИ к заданному уровню, допустимому для силовых ключей импульсного привода (с учетом сквозного проникновения СЭМИ с коротким фронтом через продольно проходные емкостно-резистивные цепи других узлов).



ТП — токоприемник;  
 Р — разрядник (вилитовый);  
 УР — управляемый разрядник (вилитовый);  
 ЗУ — заземляющее устройство;  
 БВ — быстродействующий выключатель (аварийный);  
 СР — силовой реактор;  
 КБВ — комбинированный (тиристорно-дуговой) быстродействующий выключатель;  
 ЦРЭ — цепь рекуперации энергии (в режиме торможения);  
 ЦП — цепь питания (в режиме тяги);  
 ЗНР — защитный нелинейный резистор (варистор);  
 ЕФ — емкостный фильтр;  
 УДК — управляемая дугогасительная камера;  
 ЦК — цепь коммутации (запирания);  
 СП — схема поджига (иницированная);  
 СУ — схема управления;  
 ИП, УИП — неуправляемый и управляемый искровые промежутки.

Помимо вышеуказанного, в состав силового реактора (СР) с заземленным магнитным сердечником введен дополнительный предвключенный воздушный дроссель ( $L'$ ), позволяющий снизить амплитуду проходного кондуктивного СЭМИ и исключающий пробой изоляции первых нескольких витков основной обмотки СР.

Для защиты от контактно-коммутационных КИН применены следующие два устройства:

- тиристорно-диодное шунтирование СР ( $VS-VDCP$ ) для снижения колебательного перенапряжения на емкостном фильтре (ЕФ);
- защитный нелинейный резистор (варистор-ЗНР) с защитным тиристором ( $VS_3$ ), управляемым по напряжению (с помощью схемы управления СУ).

Уровень самоотпирания  $VS_{CP}$  по напряжению выбран так, чтобы он превышал величину обратной ЭДС самоиндукции  $L_{CP}$  от пульсаций напряжения в питающей сети.

Защитный нелинейный резистор (ЗНР) подключается с помощью защитного тиристора ( $VS_3$ ) при достижении заданного допустимого уровня напряжения на емкостном фильтре (ЕФ). По окончании импульса перенапряжения с помощью цепи коммутации (ЦК) ЗНР отключается.

Многие смежные вопросы защиты от мощных и сверхмощных ЭМИ в соответствии с нормами по ЭМС рассмотрены в [8].

### Литература

1. Тихменев Б. Н., Трахтман Л. М. Подвижный состав электрических железных дорог. Теория работы электрооборудования, электрические схемы и аппараты. Изд-во «Транспорт». 1969.
2. Резников С. Б., Савенков А. И. Пути повышения эффективности аварийных быстродействующих выключателей постоянного тока в железнодорожных тяговых схемах // Практическая силовая электроника. 2003. № 12.
3. Патент РФ на полезную модель № 24049 от 20.07.2002. Дугогасительная камера. Ламанов А. В., Белащенко М. Д., Савенков А. И., Резников С. Б., Павлов В. В., Кузмин А. А.
4. Патент РФ на полезную модель № 37271 от 10.04.2004. Дугогасительная камера выключателя постоянного тока. Белащенко М. Д., Ламанов А. В., Резников С. Б., Савенков А. И.
5. Патент РФ. Способ автоматического выключения постоянного тока и устройство для его осуществления. Белащенко М. Д., Ламанов А. В., Резников С. Б., Савенков А. И.
6. Патент РФ № 2167478 от 20.05.2001. Автоматический выключатель постоянного тока. Белащенко М. Д., Ламанов А. В., Савенков А. И., Резников С. Б., Станкевич В. А., Кузмин А. А.
7. Патент РФ № 2178928 от 27.01.2002. Выключатель постоянного тока (варианты). Белащенко М. Д., Ламанов А. В., Савенков А. И., Резников С. Б., Станкевич В. А., Кузмин А. А.
8. Захаров А. Защита промышленных приборов в соответствии с нормами по электромагнитной совместимости // Компоненты и технологии. 2006. № 5.