

## ЗАЩИТА ЭЛЕМЕНТОВ КОНТУРА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Интенсивность разработок высокоэффективных систем тяговых электроприводов (ТЭП) для электрифицированных видов транспорта не может быть реализована соответствующими темпами в практику отечественного электровозостроения без решения проблем защиты слагаемых элементов ТЭП от перенапряжений и коротких замыканий.

При этом выше изложенный первый фактор для ТЭП является определяющим условием эффективности функционирования всего электромеханического комплекса каковым и является ТЭП.

Базовым элементом контура преобразования электрической энергии (ЭЭ) в ТЭП переменного тока является инвертор напряжения (ИН). Именно ИН наиболее подвержен воздействию импульсов перенапряжений.

Природа импульсов перенапряжений в питающей контактной сети (КС) весьма разнообразна, но, в основном, они вызваны отрывами пантографа электровоза от КС, что происходит постоянно при движении состава с интервалом 2-4 сек.

Проблема усугубляется при скольжении колесных пар, что весьма характерно для рудничных электровозов. При этом параметры возникающего импульса перенапряжения зависят от величины отключаемого нормального или аварийного тока, от индуктивности сети в месте отключения нагрузки, от индуктивности сети в месте подключения защищаемой СП, от времени срабатывания коммутационного аппарата и т.д. В итоге вышеотмеченные параметры перенапряжения не имеют однозначного определения, - обычно принимают опосредствованные данные.

Интенсивность воздействия перенапряжения в сети призван снизить входной фильтр инвертора напряжения ТЭП. Для оценки эффективности фильтра примем следующие исходные положения.

Длительность  $t_e$  импульса перенапряжения  $e_G$  варьируется от мкс до максимума  $t_e = 10\text{мс}$ . Рассмотрим наиболее характерные случаи:

1-й случай: на систему воздействует «короткий» импульс  $e_G$ , самый неблагоприятный момент его возникновения, - на вершине синусоиды одного из фазных напряжений  $U_G$  (рис. 1).

2-й случай: на систему воздействует «длинный» импульс  $e_G$ , возникающий в момент прохождения фазного напряжения  $U_G$  через нуль.

Форма импульса перенапряжения принята прямоугольной с амплитудой  $E_{GM}$ , хотя реальный импульс имеет более «мягкую» форму.

Амплитуда внешнего импульса перенапряжения оговаривается для каждого конкретного случая отдельно.

Для простоты изложения рассмотрим электромагнитный процесс в Г-образном LC фильтре, временная характеристика которого описывается выражением (1):

$$U_2(t) = U_d \left[ 1 - \frac{\omega_m}{\omega_R} \exp(-\delta t) \cdot \sin(\omega_R t - \psi_R) \right], \quad (1)$$

$$\text{где } \omega_m = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \omega_R = \sqrt{\omega_m^2 - \delta^2}, \quad T_R = \frac{2\pi}{\omega_R}, \quad \psi_R = \arctan \frac{\omega_R}{\delta}, \quad \delta = \frac{R}{2L}.$$

В первом случае при некоторой длительности «короткого» импульса  $t_e$  к моменту его окончания имеем идеально на выходе фильтра:

$$e_{Ze} = E_{Gm} \cdot (1 - \cos \omega_m t_e); \quad (2)$$

$$U_{Ge} = U_{Gm} \cdot \sin \omega_1 \left( \frac{T_1}{4} + t_e \right); \quad (3)$$

$$U_{Ze} = U_{Ge} + e_{Ze}. \quad (4)$$

Во втором случае – «длинного» импульса перенапряжения

$$E_{Zm} \approx 2E_{Gm}, \quad (5)$$

$$U_{Zm} \approx 2E_{Gm} + U_{Gm} \cdot \sin \omega_1 \frac{T_M}{2}. \quad (6)$$

В обоих случаях величины  $U_{Ze}$  и  $U_{Zm}$  могут превысить допустимое значение  $U_Z(\text{доп}) \approx (1,15-1,20) U_{Gm}$ .

Ограничение уровня напряжения на конденсаторе фильтра менее допустимого за счет увеличения параметров элементов фильтра явно неприемлемо.

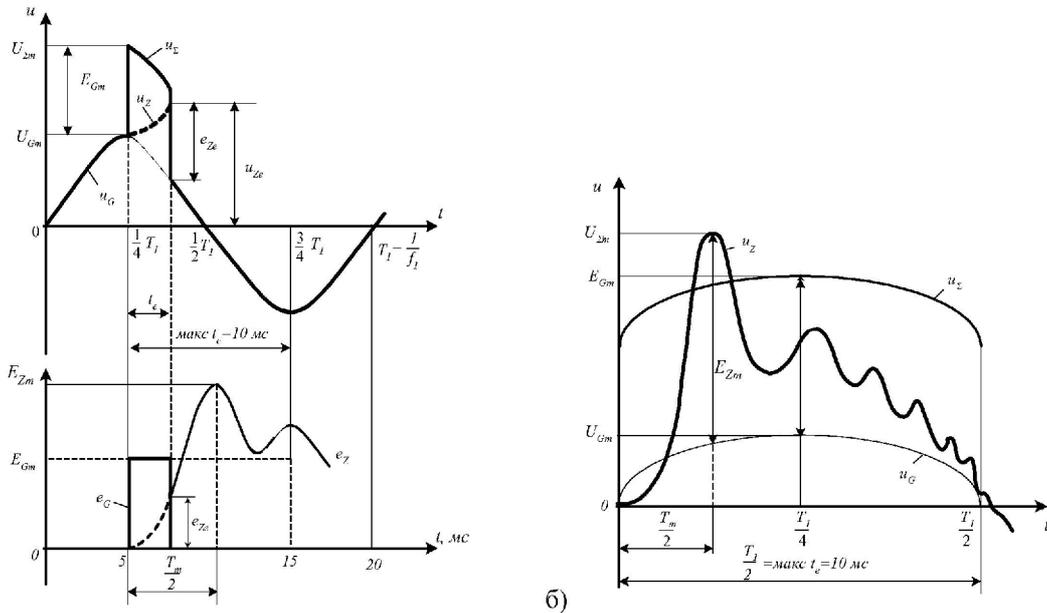


Рис. 1 Диаграммы напряжений в системе при воздействии на нее «короткого» и «длинного» ( $t_e = \text{макс } t_e = 10\text{мс}$ ) импульса перенапряжения  $e_G$

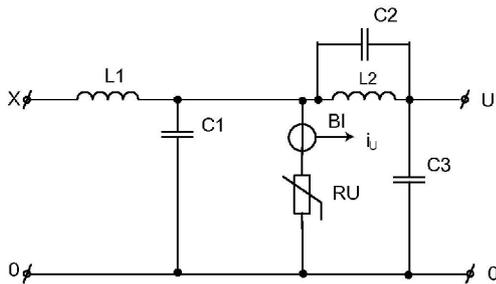


Рис. 2 Схема синусового фильтра с варистором RU и датчиком сверхнапряжений BI

Решение проблемы возможно путем применения мощных полупроводниковых ограничителей напряжения типа ОНС 233-200 или варисторов RU, устанавливаемых параллельно фильтровому конденсатору, например, по рис. 2.

Новым в этой схеме является предложение авторов контролировать срабатывание варистора RU, для чего последовательно с ним включить простейший датчик тока BI, который будет выдавать сигнал  $i_U$  в систему управления электропривода. По сигналу  $i_U$  система управления выдает информацию и ведет учет наличия перенапряжений, а в случае превышения параметров варистора по току и длительности его протекания аварийно отключает электропривод от сети. Использование

варистора позволяет не завышать параметры фильтра, а применение датчика тока, с выдачей сигнала срабатывания варистора повышает надежность работы СП в целом.

К вопросу защиты электропривода тесно примыкает проблема защиты полупроводниковых приборов преобразователя. Дело в том, что кроме внешних перенапряжений в преобразователе имеют место внутренние из-за наличия паразитных индуктивностей монтажных цепей, которые генерируют ЭДС самоиндукции при высоких скоростях коммутации IGBT-транзисторов и диодов. Для борьбы с пиками напряжения паразитных индуктивностей полупроводниковые приборы шунтируют снабберными демпфирующими цепочками. Примеры схем снабберов приведены на рис. 3, 4. Рекомендации по их применению и параметрам сведены в таблицу 1.

Однако, применение только снабберов недостаточно для надежной защиты полупроводниковых приборов от перенапряжений. Действительно, при выходе из строя любого элемента снаббера в следующий же момент будет выходить из строя «беззащитный» IGBT-транзисторный модуль.

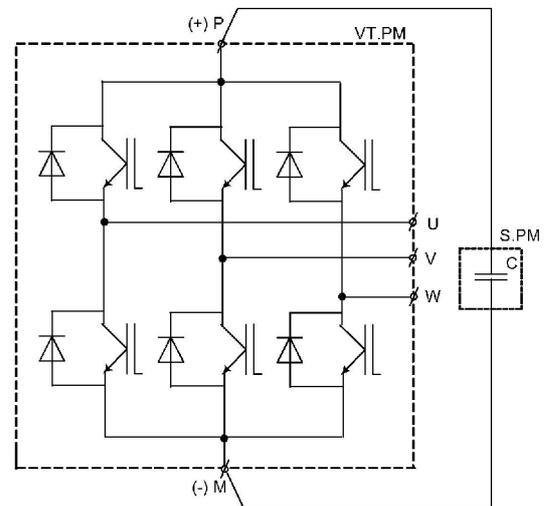


Рис. 3 Схема подключения С-снаббера S.PM к 6-пакет слаботочному IGBT-модулю VT.PM

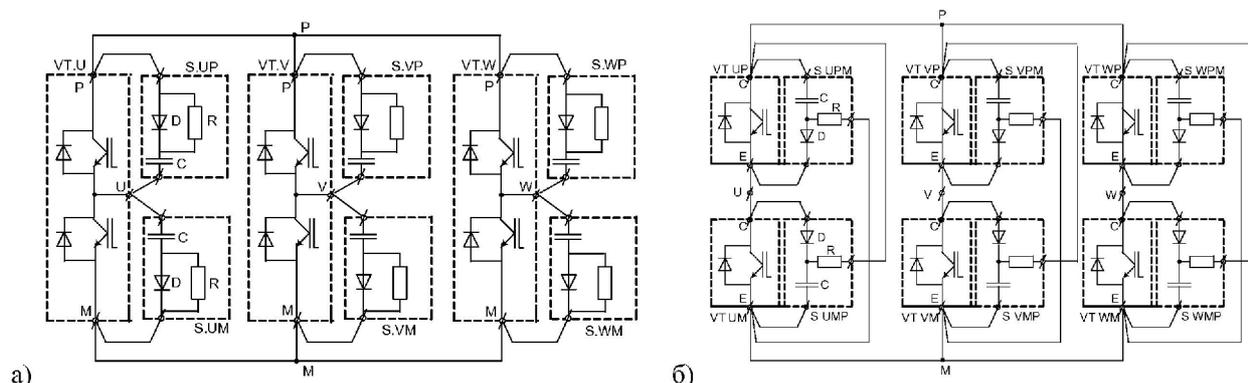


Рис. 4 Схема подключения RCD-снабберов к 2-pack (а) и к 1-pack среднеточным IGBT-модулям (б)

Авторами, на основании аналитических исследований, предложено дополнить схемы, представленные на рис. 4 – 6 цепочками из варистора RU и датчика тока VI, аналогично рис. 6, подключив их непосредственно к модулям [2].

Таким образом, к применению рекомендуются:

1. Специальные снабберные конденсаторы типов PMB, PPA производства фирмы ICEL, Италия.
2. Специальные снабберные диоды типов RM.HG-S производства Mitsubishi и BYP производства Siemens AG.

Особенностью такого решения является то, что при первом же срабатывании варистора система управления по сигналу  $i_U$  датчика тока VI отключает электропривод. Объясняется это следующим. Внутренние перенапряжения поддаются точному учету и ограничению снабберами в нормальных режимах работы электропривода и, если они превысили уровень срабатывания варистора, то это возможно только вследствие либо повреждения снаббера, либо вследствие какой-то другой аварии.

Таблица 1 Применение схем снабберов и параметры цепей

Схема снаббера, номер рисунка	Тип IGB-транзисторного модуля	Ток коллектора IGB-транзистора, мгновенное значение длительно, [А]	Емкость S-конденсатора, [мкФ]
4	6 pack	15-75	0,047-0,22
		100-200	0,33-0,68
5	2 pack	200	0,68≤
		300-400	1,0-1,5
		500-600	2,0-2,4
5	1 pack	400	1,5≤
		500-600	2,0-2,4
		800-1000	3,3-4,0

Действительно, емкость снабберного конденсатора  $C_{SC}$ , кроме ориентировочной величины, указанной в табл. 1, определяется выражением:

$$C_{SC} \geq L_p \frac{i_K^2}{\Delta U^2}, \quad (7)$$

где  $L_p$  - паразитная индуктивность монтажных цепей;

$i_K$  - коммутируемый ток;

$\Delta U$  - допустимое внутреннее перенапряжение (превышение напряжения над нормальным значением).

И, если  $\Delta U$  превысило уровень срабатывания варистора, то это возможно в случае уменьшения  $C_{SC}$  или превышения нормального  $i_K$ .

Итак, вырисовывается следующая картина защитных цепей полупроводниковых приборов преобразователя, – кроме традиционных снабберов к IGB-транзисторным модулям непосредственно подключаются цепочки варисторов и датчиков тока, что обеспечивает повышение надежности преобразователя.