

О СЕЛЕКТИВНОЙ РАБОТЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ПРИ ВНУТРЕННЕМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

У статті приведений аналіз впливу параметрів запобіжника та контуру короткого замикання на селективну роботу запобіжників у напівпровідниковому перетворювачі.

В статтє приведен анализ влияния параметров предохранителя и контура короткого замыкания на селективную работу предохранителей в полупроводниковом преобразователе.

Интенсивный толчок производству быстродействующих предохранителей дало широкое применение силовой полупроводниковой техники, вследствие чего возникла необходимость защиты полупроводниковых вентилях от токов короткого замыкания. В ряде устройств быстродействующие предохранители являются основной или даже единственной токовой защитой [1].

Основная особенность предохранителей, предназначенных для защиты полупроводниковых вентилях, связана с весьма сильной чувствительностью полупроводниковых приборов к перегрузкам. Поэтому наряду с высокой разрывной способностью к предохранителям данного типа предъявляются такие требования, как селективность и отсутствие опасных перенапряжений. Чаще всего эти требования противоречивы и нелегко разрабатывать предохранители с комплексом всех требуемых характеристик. Так, например, обеспечение высокого быстродействия, достигаемого использованием достаточно высокой плотности тока в плавком перешейке, находится в полном противоречии с требованием надёжной работы предохранителя в продолжительном режиме. Достижение короткого времени гашения дуги связано с необходимостью получения высокого напряжения на дуге, однако, очень большое перенапряжение может привести к пробоем полупроводниковых вентилях. Поэтому напряжения не должны превышать вполне определенных величин.

Как показал обзор литературных источников и патентных материалов, в последнее время предложено большое количество оригинальных идей, конструктивных и схемных решений, связанных с улучшением технико-экономических показателей быстродействующих предохранителей. Однако, анализ выпускаемых в настоящее время промышленностью конструкций быстродействующих предохранителей показывает, что по ряду причин, в первую очередь, экономического, технологического и эксплуатационного характера, большая часть предложенных идей и конструктивных решений не получила промышленной реализации.

Основным типом быстродействующих предохранителей, используемых в промышленности, являются предохранители с серебряными ленточными плавкими элементами, имеющими суженные части (перешейки), и кварцевым наполнителями с высокой степенью его уплотнения, которые по своим технико-экономическим характеристикам более полно, чем другие типы быстродействующих предохранителей,

удовлетворяют требованиям защиты полупроводниковых вентилях.

Под селективностью понимают координацию рабочих характеристик двух или нескольких аппаратов защиты от сверхтоков таким образом, что при возникновении сверхтоков аппарат, предназначенный срабатывать в этих условиях срабатывает, в то время как другие аппараты не срабатывают [2]. Селективная работа предохранителей предполагает также, что из ряда последовательно включенных в цепь предохранителей один полностью отключает цепь аварийного тока раньше, чем плавкие элементы остальных предохранителей будут подвергнуты повреждениям (расплавлению и подплавлению перешейков, окислению материала плавкого элемента, подрыву под действием электродинамических сил и т.п.) [3]. Следствием этих повреждений в полупроводниковых преобразователях, защищаемых предохранителями, является преждевременный выход из строя большого количества предохранителей.

Требования к селективности срабатывания предохранителей общепромышленного применения заключается в том, чтобы при одном и том же аварийном токе предохранитель меньшего номинального тока, установленный ближе к месту короткого замыкания, например, у электродвигателя, срабатывал быстрее, чем расплавится плавкий элемент предохранителя большего номинального тока, установленного, например, на фидере. При этом преследуется цель бесперебойного питания объектов, включенных параллельно с тем, где произошло короткое замыкание.

В преобразовательной установке требования к селективности срабатывания быстродействующих предохранителей, как и преследуемые при этом цели, несколько иные и определяются особенностями схемы их включения. Предохранитель в поврежденной ветви должен отключить цепь раньше, чем расплавятся плавкие элементы предохранителей плеча с неповрежденными вентилями, т.е. в быстродействующих предохранителях условие селективности выполняется при определенных соотношениях между временем срабатывания и временем плавления предохранителей одного и того же номинального тока.

Таким образом, в отличие от селективного срабатывания предохранителей в общепромышленных электроустановках, селективное срабатывание быстродействующего предохранителя обеспечивает непрерывность работы преобразователя, в котором произошло короткое внутреннее замыкание.

Выбор предохранителей при защите преобразовательных установок с полупроводниковыми выпрямителями по условиям селективности их срабатывания имеет ряд особенностей, связанных как с видами и параметрами схемы, так и с местом включения предохранителя. На рисунке показана схема трехфазного преобразовательного моста с тремя параллельными цепочками полупроводниковый прибор – предохранитель в момент, когда выпрямительный ток проходит в нагрузку через плечи 2 и 4. Если в этот момент один из вентиляй, например, плеча 5 потеряет запирающие свойства, то возникает внутреннее короткое замыкание в цепи. Предохранитель с поврежденной ветви оказывается включенными с n параллельными такими же предохранителями. Авария будет ликвидирована и преобразователь продолжит свою нормальную работу, если плавкие элементы здорового плеча с неповрежденными вентилями не успеют расплавиться, пока предохранитель в поврежденной ветви полностью отключит цепь.

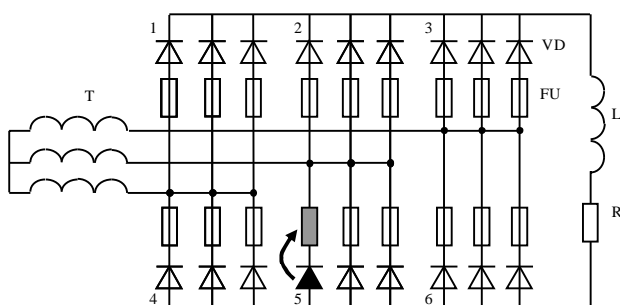


Схема внутреннего короткого замыкания в трехфазном мостовом полупроводниковом выпрямителе

Как известно [3], основное назначение быстродействующих предохранителей для защиты полупроводниковых вентиляй заключается, с одной стороны, в селективном отключении только поврежденной ветви и в обеспечении, таким образом, бесперебойной работы преобразователя. С другой стороны, в случае общей аварии, охватывающей все параллельные ветви, отключение преобразователя должно осуществляться фидерным автоматом без срабатывания индивидуальных предохранителей вентиляй защиты. В связи с этим, защита преобразователя должна одновременно обеспечивать быстродействие и селективность при достаточной надежности работы, т.е. удовлетворять требованиям, противоречащим друг другу.

Существует несколько видов селективности. Одним из важнейших является селективность между самими предохранителями при внутреннем коротком замыкании в преобразователе. Такой вид селективности регламентирует связь между полным интегралом Джоуля или интегралом отключения (operational Joule integral – I^2t_o) и преддуговым интегралом Джоуля (pre-arcing Joule integral – I^2t_p) предохранителя в виде

$$I^2t_o \leq [n \cdot (1 - p) + p]^2 \cdot I^2t_p, \quad (1)$$

где n – число параллельных ветвей преобразователя; p – коэффициент неравномерности распределения тока между ветвями преобразователя, определяющий отклонение тока в данной ветви относительно номинального значения.

Например, $p = 0,1$ означает, что ток в данной ветви преобразователя может составлять 1,1 или 0,9 номинального значения. При $p = 0$ токи между ветвями преобразователя распределяются равномерно. Из (1) следует, что увеличение n и уменьшение p облегчают обеспечение селективности. Наиболее трудно достичь селективности при $n = 2$. Если такая селективность будет достигнута, то при всех $n > 2$ селективность будет автоматически обеспечиваться. Параметры n и p определяются внешними условиями работы предохранителя в преобразователе.

Однако существует весьма важные внутренние факторы, определяющие соответствие между интегралами отключения и преддуговыми в зависимости от конструкции предохранителя. Параметры же n и p фактически задают предельные соответствия между этими интегралами, допустимые для предохранителя в данном агрегате. Например, при $p = 0,3$ (обычно $p = 0,1 \div 0,4$) и $n = 2$ условие (1) удовлетворяется, если интеграл отключения предохранителя превышает преддуговой интеграл не более чем в 2,89 раза, при $p = 0,2$ и $n = 2$ не более чем в 4 раза, при $n = 3$ – в 9 раз, $n = 4$ – 16 и $n = 5$ – в 25 раз. Влияние параметров предохранителя и контура короткого замыкания на селективность проанализируем для различных значений ожидаемого тока короткого замыкания I_k (среднеквадратичное значение) и начальной фазы короткого замыкания ψ .

Для анализа преддугового этапа воспользуемся системой дифференциальных уравнений [3]:

$$\frac{di}{dt} = (u_c - R \cdot i - u_n) / L \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = a^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{1}{S_x} \cdot \frac{dS_x}{dx} \right) + i^2 \cdot \rho / (c \cdot \gamma \cdot S_x^2) \quad (3)$$

где u_c – мгновенное значение напряжения источника питания, В; R – активное сопротивление контура, Ом; i – мгновенное значение тока, А; t – время, с; L – индуктивность контура, Гн; u_n – мгновенное значение напряжения на предохранителе, В; θ – мгновенное значение температуры перешейка, °С; a – коэффициент температуропроводности, определяемый соотношением $a^2 = \lambda / c \cdot \gamma$, см² / с; S_x – сечение плавкого элемента по координате x , см²; x – координата по длине плавкого элемента, см; λ – коэффициент теплопроводности материала плавкого элемента, Вт/(см·°С); c – удельная теплоемкость, Дж / (Г·°С); γ – удельная плотность, Г / см³; ρ – удельное электрическое сопротивление материала плавкого элемента, Ом·см.

Первое уравнение приведенной системы – это уравнение баланса напряжений электрической цепи. Второе – уравнение нагрева перешейка. Как показали проведенные исследования, для режима КЗ можно пренебречь теплоотдачей с поверхности плавкого элемента в кварцевый наполнитель, корпус и далее в окружающую среду, учитывая только теплоотдачу от перешейка в широкую часть плавкого элемента.

Для анализа дугового этапа использовалась система дифференциальных уравнений, состоящая из уравнения (2) и уравнения объема выгорания материала плавкого элемента:

$$V = C \cdot \left(\frac{1}{m} \cdot \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt \right)^N \quad (4)$$

где C и N – эмпирические коэффициенты (из расчета на один перешеек), зависящие от материала плавкого элемента и условий горения дуги; V – суммарный объем выгоревшего материала плавкого элемента, см³; t_1 – время образования дуги, с; t_2 – время гашения дуги и отключения электрической цепи, с; m – число параллельных перешейков, определяющих сечение плавкого элемента.

Исследовались быстродействующие плавкие предохранители на номинальный ток 630 А, номинальное напряжение 660 В.

Плавкий элемент имел следующие параметры: материал плавкого элемента – серебро; δ – толщина плавкого элемента – 0,01 см; b_0 – ширина перешейка – 0,015 см; d_0 – диаметр отверстия, которыми образуются параллельные перешейки – 0,15 см; n – число последовательных перешейков – 4; l – расстояние между соседними последовательными перешейками – 1,0 см; m – число параллельных перешейков – 73.

Таблица 1. Расчетные значения интегралов Джоуля

ψ	I_k	$I^2 t_p \cdot 10^3$	$I^2 t_o \cdot 10^3$	A_1	I_k	$I^2 t_p \cdot 10^3$	$I^2 t_o \cdot 10^3$	A_1	I_k	$I^2 t_p \cdot 10^3$	$I^2 t_o \cdot 10^3$	A_1
0	10	94,5	463	4,90	100	94,9	485	5,11	200	95,1	414	4,35
0,3		94,5	462	4,89		95,0	573	6,03		95,2	508	5,34
0,6		94,5	457	4,84		94,8	702	7,41		95,3	683	7,17
0,9		94,5	432	4,57		95,0	812	8,58		95,5	836	8,75
1,2		94,5	383	4,05		95,2	865	9,09		95,6	925	9,68
1,5		94,5	304	3,22		95,3	847	8,89		95,7	927	9,69

Снижение U_c относительно номинального напряжения предохранителя улучшает селективность работы [3]. Повышение номинального тока предохранителей (увеличение сечения S) практически не изменяет условий селективности между предохранителями, однако улучшает селективность предохранителей с фидерными выключателями при сохранении номинального тока фидерных выключателей. Это объясняется тем, что одновременно с увеличением преддугового интеграла Джоуля из-за увеличения сечения перешейков возрастает также и дуговой интеграл Джоуля. В конечном счете, соотношение между полным интегралом Джоуля (интегралом отключения) и джоулевым преддуговым интегралом Джоуля в общем не изменяется. Однако соотношения между полным интегралом Джоуля (интегралом отключения) фидерного выключателя и преддуговым интегралом Джоуля предохранителя в этом случае изменяется из-за увеличения последнего при росте номинального тока предохранителя и неизменности первого в случае сохранения номинального тока фидерного выключателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Глух Е.М., Зеленев В.Е. Защита полупроводниковых преобразователей. – М.: Энергия, 1970. – 152 с.
2. IEC 60050-441: 1984, Amendment 1: 2000-07. International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 441: Switchgear, controlgear and fuses. – 118 p.

Параметры контура короткого замыкания выбирались для трех значений токов с соответствующими коэффициентами мощности:

- 1) $I_k = 10$ кА; $\cos \varphi = 0,3$;
- 2) $I_k = 100$ кА; $\cos \varphi = 0,1$;
- 3) $I_k = 200$ кА; $\cos \varphi = 0,1$.

При этом среднеквадратичное значение напряжения источника U_c принималось равным 730 В, коэффициент неравномерности p – равным нулю, а начальная фаза ψ изменялась в пределах $0 \dots 1,5$ рад.

Результаты расчета по методике, представленной в [4], приведены ниже в таблице 1, где $A_1 = I^2 t_o / I^2 t_p$, при $n = 1$.

Анализ результатов расчета позволил сделать следующие выводы. В то время, как преддуговой интеграл Джоуля определяется сечением перешейков, дуговой интеграл Джоуля зависит главным образом от угла ψ и от тока контура. Отношение A_1 изменяется в широких пределах от 3,20 до 9,70, что не обеспечивает селективности работы предохранителей при $n = 2$ и 3. Условия селективности при $n = 4$ для предохранителей этого типа удовлетворяется во всем диапазоне изменения I_k .

3. Намитокон К.К., Ильина Н.А., Шкловский И.Г. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280с.

4. Фомин В.И. Расчет процесса отключения быстродействующими предохранителями токов короткого замыкания. Вестник НТУ "ХПИ". – 2005. – № 36.

Bibliography (transliterated): 1. Gluh E.M., Zelenov V.E. Zashchita poluprovodnikov'ih preobrazovatelei'. - M.: Energija, 1970. - 152 s. 2. IEC 60050-441: 1984, Amendment 1: 2000-07. International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Chapter 441: Switchgear, controlgear and fuses. - 118 p. 3. Namitokov K.K., Ilina N.A., Shklovskii I.G. Apparat' i dlja zashchit'i poluprovodnikov'ih ustro'itv. - M.: Energoatomizdat, 1988. - 280s. 4. Fomin V.I. Raschet protsecca otkljuchenija b'itrode'ctvu-juschimi predohraniteljami tokov korotkogo zam'ikanija. Vestrnik NTU "HPI". - 2005. - № 36.

Поступила 14.12.2010

Fomin V.I.

On selective operation of protection device in a semiconductor converter under internal short.

The paper analyzes action of protection device and short circuit loop parameters on selective operation of protection device in a semiconductor converter.

Key words – semiconductor converter, internal short circuit, protection device, selective operation.