

ВЛИЯНИЕ КВАРЦЕВОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ГАШЕНИЕ ДУГИ В ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯХ

Фомин В.И., к.т.н., доц.,

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"

тел. (057) 707-69-76

У статті показано вплив градієнта напруги у стовпі дуги від складу та ступеня ущільнення кварцевого наповнювача у плавких запобіжниках, зроблено опис засобів засипки наповнювача та проведено їх аналіз.

В статье показано влияние градиента напряжения в столбе дуги от состава и степени уплотнения кварцевого наполнителя в плавких предохранителях, сделан обзор способов засыпки наполнителя и проведен их анализ.

Известно [1], что градиент напряжения в створе дуги значительно повышается не только в узких щелях, но и в каналах малого диаметра. Примером подобного устройства являются плавкие предохранители с кварцевым наполнителем. Такую зависимость градиента напряжения в створе дуги от плотности тока на фронте выгорания можно объяснить следующим образом [2]. Плотность тока в основаниях дуги (принято, что дуга занимает всю поверхность на фронте выгорания) определяет плотность подводимой к электродам энергии, которая, в свою очередь, влияет на интенсивность генерации газовой среды за счет испарения электродов и близлежащих слоев наполнителя. Скорость генерации газовой среды определяет величину давления в канале, где горит дуга, и интенсивность плазменных струй. Поэтому наблюдаемый рост градиента при увеличении плотности тока в основаниях дуги свидетельствует о существенном влиянии приэлектродных процессов на характеристики дуги в плавких предохранителях с наполнителем.

Уравнение регрессии зависимости $E(t) = f(j)$ запишется в виде

$$E_a = A \cdot j(t) + B.$$

Коэффициенты A и B определялись экспериментальным путем по методу наименьших квадратов.

Качественный анализ можно произвести следующим образом. Напишем для дуги в таком предохранителе уравнение энергетического баланса [1]:

$$F \cdot c \cdot \frac{d\vartheta}{dt} = E_a \cdot I - K \cdot F_1 \cdot (\vartheta - \vartheta_0),$$

где F – поверхность канала, в котором горит дуга, на единицу длины; c – теплоемкость кварцевого наполнителя; E_a – градиент напряжения в створе дуги и F_1 – поверхность дуги на единицу длины.

Для того, чтобы дуга гасла, необходимо, чтобы температура ее уменьшалась, т.е. должно быть выполнено неравенство:

$$\frac{d\vartheta}{dt} < 0.$$

Тогда $E_a \cdot I - K \cdot F_1 \cdot (\vartheta - \vartheta_0) < 0$

или $K \cdot F_1 \cdot (\vartheta - \vartheta_0) > E_a \cdot I.$

Отсюда в пределе получим:

$$E_a = \frac{K \cdot F_1}{I} (\vartheta - \vartheta_0).$$

Это уравнение свидетельствует о том, что для успешного гашения дуги необходимо увеличивать поверхность F_1 и уменьшать ток I . То и другое практически достигается подразделением плавкого элемента предохранителя на параллельные ветви.

При токах порядка десятков килоампер средний градиент в створе дуги может достигать 300-500 В/см и более. Плотность тока в дуге предохранителя достигает 50-100 кА/см².

Столь большие градиенты и плотности тока связаны не только с сильной теплоотдачей от дуги к окружающим ее зернам песка, но и с повышенным давлением, развивающимся в области дуги и ее ближайшего окружения. Давление в предохранителе с наполнителем можно рассчитать следующим образом. Будем исходить из уравнения состояния совершенных газов:

$$P \cdot V = K \cdot W,$$

где V – объем, занимаемый дугой и практически немного больший объема вставки; K – const и W – энергия.

Так как длительность дуги в плавких предохранителях с кварцевым наполнителем очень мала, то можно допустить, что выделяющаяся в ней энергия равна энергии, запасенной при данном токе в индуктивности цепи, т.е.

$$W = \frac{1}{2} L \cdot I^2;$$

$$P \cdot V = K \cdot \left(\frac{1}{2} L \cdot I^2 \right),$$

причем $K = 1,05 \approx 1$.

Таким образом давление можно найти из уравнения:

$$P = \frac{K}{2 \cdot V} L \cdot I^2 \approx \frac{L \cdot I^2}{2 \cdot V}.$$

Отсюда следует, что давление растет пропорционально квадрату тока и сильно зависит от степени уплотнения кварцевого наполнителя. Применение методов вибрационной технологии засыпки кварцевого песка в предохранитель было вызвано требованием существенного повышения защитных характеристик предохранителей, которые начали использоваться в силовых полупроводниковых установках.

Основные функции наполнителя в период горения дуги следующие [3]:

1. Увеличение преддугового джоулеа интеграла благодаря улучшению теплоотдачи от перешейков.

2. Отбор энергии дуги в результате плавления и испарения наполнителя, что обеспечивает быстрое спадание тока к нулю и уменьшение габаритных размеров предохранителя.

3. Формирование фульгуритных трубок, содержащих дугу внутри твердой структуры наполнителя, что в определенных пределах предотвращает слияние дуг и пробой между элементами.

4. Содействие гашению дуги с помощью давления, образованного внутри фульгуритной трубки.

5. Демпфирование переходного восстанавливающегося напряжения в защищаемой цепи благодаря повышенной электропроводности наполнителя.

Доминирующей функцией наполнителя является обеспечение надежного гашения дуги.

Наполнитель в виде кварцевого песка должен быть чистым, однородным по цвету; влажность его перед засыпкой в корпус предохранителя должна быть не более 0,05%, а зерновой состав следующим: от 0,02 до 0,1 мм - не более 1,5%, от 0,1 до 0,63 мм не менее 98%, глинистая составляющая не более 0,5%.

Используемый в предохранителях наполнитель обычно представляет собой зернистый материал, состоящий из дискретных соприкасающихся друг с другом сравнительно твердых зерен и пустот между ними. Зерна могут перемещаться относительно друг друга, пустоты обычно заполнены воздухом.

При весьма малых зернах зазоры между ними также весьма малы и условия гашения дуги приближаются к условиям гашения дуги, возникающей между твердыми стенками. Охлаждающее действие наполнителя в начальный момент дуги очень сильное, благодаря чему напряжение на дуге достаточно высоко. Однако, малые зазоры затрудняют прохождение расплавленного металла между зернами. Это существенно увеличивает наличие в дуге паров металла, вызывает сильный нагрев и расплавление наполнителя. В свою очередь резко снижается охлаждающее действие наполнителя, следствием чего становятся снижение напряжения на дуге, увеличение рассеиваемой энергии и, в конечном счете, опасность взрыва.

При очень больших зернах расплавленный металл легко проходит через зазоры между ними, однако, охлаждающее действие наполнителя и его энергопоглощающая способность ослабевают. Такие зерна в целом создают меньшую поверхность охлаждения, которая обратно пропорциональна их диаметру.

Экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что защитные характеристики предохранителя зависят также и от распределения зерен по фракциям даже при одном и том же среднем размере.

В современных быстродействующих предохранителях засыпка наполнителя осуществляется с помощью вибрационной технологии с целью получения максимальной плотности упаковки зерен в корпусе. Параметрами, количественно характеризующими упаковку зерен, следует считать:

а) плотность упаковки, определяемую как отношение объема, занятого твердым веществом наполнителя, к полному объему, занятому наполнителем;

б) пористость – объем пустот, определяемый как разность между единицей и плотностью упаковки в %;

в) степень уплотнения

$$\alpha = \frac{P_1 - P_0}{P_0} \cdot 100\%,$$

где P_0 - масса наполнителя, заполняющего объем корпуса при свободной засыпке; P_1 - масса наполнителя, заполняющего объем корпуса при воздействии вибраций. Часто используют другой показатель плотности – массу засыпанного в предохранитель песка в расчете на единицу объема корпуса (г/см^3). Этот показатель называют объемной плотностью наполнителя. Наилучшие условия гашения дуги создаются при объемной плотности наполнителя 1,7 – 1,85 г/см^3 .

Плотность наполнителя существенно влияет на характеристики предохранителя во время дугогашения. В общем случае можно рассматривать это влияние только на вольт-секундную характеристику дуги, обуславливающую основные защитные характеристики – джоулевы интегралы, энергию дуги, пропускаемый ток, продолжительность дугогашения и др. Критерием оценки при этом является значение среднеинтегрального напряжения на дуге в течение всего этапа дугогашения. Чем больше плотность наполнителя, тем больше среднеинтегральное напряжение на дуге и лучше защитные характеристики предохранителей.

Правомерен и анализ конкретного влияния степени уплотнения наполнителя на отдельные защитные характеристики предохранителя. Экспериментальные исследования свидетельствуют о значительной интенсивности этого влияния.

Снижение объемной плотности наполнителя на 3-10%, например, путем использования свободной ручной засыпки наполнителя, приводит к снижению среднего значения напряжения на дуге на 6-15%, увеличению пропускаемого тока на 8-15%, преддугового джоулевого интеграла на 15-30%, джоулевого интеграла отключения более чем на 30% и энергии дуги более чем на 40%. При уменьшении содержания кварцевого песка на 10-20% джоулевы интегралы и энергия дуги увеличиваются в 3-5 раз, что, как правило, приводит к взрыву предохранителя.

Известно, что степень уплотнения наполнителя в предохранителе существенно влияет на его отключающую и перегрузочную способность. Так недоуплотненные и незаполненные песком предохранители нередко становятся причиной тяжелых аварий ввиду того, что они неспособны отключать аварийные сверхтоки: происходит выброс ионизированных газов, разрушение корпуса предохранителя. Кроме того, значение величин пропускаемого тока и джоулевых интегралов плавления и отключения, которыми характеризуется способность предохранителя защищать полупроводниковые агрегаты, также зависит от степени уплотнения песка в объеме плавкой вставки.

Известны способы заполнения плавких вставок предохранителей кварцевым наполнителем [4-8], в которых с целью получения высокой степени уплотнения плавкая вставка подвергается вибрации, поперечным встряхиваниям, вращением вокруг поперечной и продольной оси.

Более высокую степень уплотнения наполнителя можно достичь способами, в которых используется

давление, воздействующее непосредственно на наполнитель. Так в [9] уплотнение наполнителя производят путем введения в корпус по крайней мере одного стержня из электроизоляционного материала. суммарный объем нескольких стержней может лежать в пределах 10-15% от объема внутренней полости плавкой вставки, а каждый может быть введен в полость вставки с помощью пресса с натягом (поступательным движением через уплотнительное отверстие).

Однако и этот способ уплотнения наполнителя не обеспечивает необходимой и стабильной степени уплотнения, так как внутренний объем корпусов плавких вставок из керамики в результате неизбежных технологических отклонений колеблется в значительных пределах. В процессе уплотнения наполнителя стержнями в плавких вставках с уменьшенным объемом внутренней полости это приводит к разрыву ослабленных мест (перешейков) плавких элементов и зачастую к разрушению корпуса. В плавких же вставках с увеличенным объемом внутренней полости наполнитель уплотняется недостаточно, что приводит к ухудшению отключающей способности плавких предохранителей и зачастую к выходу из строя защищаемых объектов.

С целью повышения надежности, стабильности и улучшения защитных характеристик с кварцевым наполнителем [10] уплотнение кварцевого наполнителя производят путем ввинчивания во внутреннюю полость вставки не менее одного винта. Суммарный объем частей винтов внутри вставки лежит в пределах 15-20% от объема внутренней полости вставки. Этот способ позволяет получить необходимую стабильную степень уплотнения наполнителя без разрыва плавкого элемента и тем самым улучшить основные защитные характеристики предохранителя. Предлагаемый способ не требует для засыпки и уплотнения наполнителя специального оборудования (вибростендов, прессов), которое необходимо при других способах; он не связан с необходимостью применения специального инструмента для контроля качества засыпки. Отпадают операции вибрационного уплотнения, многократной досыпки наполнителя. Исключается возможность дополнительного уплотнения при транспортировке и эксплуатации плавких вставок.

В [11] с целью уменьшения диаметра дуги кварцевый наполнитель уплотняется встречно-направленным давлением упругих пластин под воздействием упругих элементов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Залесский А.М. Электрическая дуга отключения. Госэнергоиздат, 1963.
- [2] Фомин В.И. Определение тепловых и коммутационных характеристик быстродействующих предохранителей на стадии проектирования: Дисс. канд. техн. наук. – Харьков, 1983. - 204 с.
- [3] Намитокон К.К., Ильина Н.А., Шкловский И.Г. - Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
- [4] А.с. №817795 СССР. Способ заполнения плавких вставок предохранителей зернистым наполнителем. – Оpubл. в БИ., 1981, №12.
- [5] А.с. №89853 СССР. Способ изготовления плавких предохранителей с наполнителем. – Оpubл. в БИ., 1982, №2.
- [6] А.с. №1092600 СССР. Способ изготовления плавкого предохранителя с наполнителем. – Оpubл. в БИ., 1984, №18.
- [7] А.с. №1148057 СССР. Способ изготовления плавких предохранителей с кварцевым наполнителем. – Оpubл. в БИ., 1985, №12.
- [8] А.с. №1101922 СССР. Устройство для заполнения плавких предохранителей с зернистым наполнителем. – Оpubл. в БИ., 1984, №25.
- [9] А.с. №610208 СССР. Способ сборки плавких вставок предохранителей. – Оpubл. в БИ., 1978, №21.
- [10] А.с. №1220026 СССР. Способ сборки плавкого предохранителя. – Оpubл. в БИ., 1986, №12.
- [11] А.с. №1259364 СССР. Плавкий предохранитель. – Оpubл. в БИ., 1986, №35.

Поступила 18.03.2008