



ВОЗМОЖНОСТЬ УВЕЛИЧЕНИЯ КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ С СОСТАВНОЙ ПЛАВКОЙ ВСТАВКОЙ

Кузнецов А.В., Юренков Ю.П.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия
alxim2@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Оценка состояния исследований в области разработки ограничителей тока на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей и увеличение коммутационного ресурса жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей с составной плавкой вставкой. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся метод анализа научной литературы, а также метод расчета зависимостей для разных материалов плавкой вставки, реализованный средствами компьютерной математики. РЕЗУЛЬТАТЫ. В литературных источниках имеются сведения о конструкциях жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей (ЖСП) и их исследованиях, позволяющие сделать выводы о их жизнеспособности и возможности получения практического выхода. Общим недостатком конструкции ЖСП является ограниченный коммутационный ресурс, обусловленный увеличением диаметра плавкой вставки под действием дуговой эрозии. Значительным эффектом повышения коммутационного ресурса и стабильности защитной характеристики обладает конструкция ЖСП с составной плавкой вставкой (ЖСПС). Однако в таких конструкциях снижается коммутационная способность. Показано, что главным критерием работоспособности ЖСПС является величина соотношения значения шунтирующего сопротивления и сопротивления электрической дуги. Работоспособность ЖСП обеспечивается при значениях этой величины ниже критических. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложенное математическое выражение может оказаться полезным при разработке конструкций ЖСП, например, при выборе материала электрода, жидкого металла и т.п., что позволит значительно увеличить коммутационный ресурс ЖСПС.

Ключевые слова: жидкометаллический самовосстанавливающийся предохранитель; ограничитель тока; коммутационный ресурс; жидкий металл; короткое замыкание.

Благодарность: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90307.

Для цитирования: Кузнецов А.В., Юренков Ю.П. Возможность увеличения коммутационного ресурса жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей с составной плавкой вставкой // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. №5. С. 139-149. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-139-149.

POSSIBILITY OF INCREASING THE SWITCHING RESOURCE OF LIQUID-METAL SELF-REGULATING FUSES WITH FUSION INSERT

AV. Kuznetsov, YP. Yurenkov

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia
alxim2@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. Assessment of the state of the art in the development of current limiters based on liquid metal self-healing fuses and an increase in the switching life of self-healing fuses

with a composite fuse-link. **METHODS.** When solving the problem, the method of literature analysis was used, as well as the method for calculating dependencies for different materials of the fuse-link, the implemented method of scientific computer mathematics. **RESULTS.** Literary sources contain information about the designs of liquid-metal self-healing fuses and their research, allowing conclusions to be drawn about their viability and the possibility of obtaining a practical yield. A common disadvantage of the of liquid-metal self-healing fuses design is a limited switching resource due to an increase in the diameter of the fuse-link under the action of arc erosion. A significant effect of increasing the switching resource and the stability of the protective characteristic is possessed by the design of a of liquid-metal self-healing fuses with a composite fusible link. However, in such designs, the switching capacity is reduced. It is shown that the main criterion for the operability of the liquid-metal self-healing fuses with a composite fusible link is the value of the ratio between the value of the shunting resistance and the resistance of the electric ARC. The performance of the liquid-metal self-healing fuses with a composite fusible link is ensured at values of this value below critical. **CONCLUSION.** The proposed mathematical expression may turn out to be useful in the development of liquid-metal self-healing fuses with a composite fusible link design, for example, when choosing an electrode material, liquid metal, etc. This will significantly increase the switching resource of the liquid-metal self-healing fuses with a composite fusible link. The condition must be taken into account in the parametric synthesis of the current limiter based on the liquid-metal self-healing fuses with a composite fusible link.

Keywords: liquid-metal self-healing fuses; current limiter; switching resource; liquid metal; short circuit.

Acknowledgment: the reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90307.

For citation: Kuznetsov AV, Yurenkov YP. Possibility of increasing the switching resource of liquid-metal self-regulating fuses with fusion insert. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(5): 139-149. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-139-149.

Введение

Первые публикации об опытных образцах жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей (ЖСП) появились в 60-е годы прошлого столетия. Можно сказать, что количество проведенных исследований на сегодня, как в РФ, так и за рубежом пока не позволяет разработать промышленные образцы ЖСП для использования в системах электроснабжения. Исследования в этой области проводятся отдельными группами ученых во многих странах. К ним относятся США, Япония, РФ, Китай, и др. Устройства на основе ЖСП и сами ЖСП обладают более высокими токоограничивающими свойствами и быстродействием, чем выпускаемые промышленностью токоограничивающие аппараты и устройства, которые могут использоваться в качестве них [1-3]. Это вызывает интерес и потребность в развитии и продолжении исследования в направлении создания макетных и промышленных образцов ЖСП и определения области их применения.

Жидкометаллический самовосстанавливающийся предохранитель – это электрический аппарат, подобный обычному предохранителю, в котором в качестве плавкого элемента применяется жидкий металл, (индий, галлий, ртуть, щелочные металлы и т.п.) расположенный в канале диэлектрической втулки. После срабатывания, остывания и конденсации паров жидкого металла, предохранитель готов к повторному действию. Создание предохранителя многократного использования вместо обычного предохранителя являлось и является заманчивым направлением деятельности.

Литературный обзор

В литературных источниках имеются сведения о подобных конструкциях ЖСП. В [1] они названы конструкциями ЖСП с управляемым временем восстановления. У такой конструкции ЖСП время восстановления может управляться или задерживаться до вмешательства дежурного персонала или средств автоматики.

Однако их исследования не доведены до создания макетных образцов и экспериментальных исследований. Говорить о ЖСП как электрическом аппарате, способном отключать цепь, как обычный предохранитель пока преждевременно.

На сегодняшний день можно говорить о ЖСП как ограничителе тока, который может использоваться только при последовательном включении с обычным коммутационным аппаратом. Необходимость использования дополнительного коммутационного аппарата обусловлена тем, что после остывания и конденсации паров жидкого металла электрическая

цепь восстанавливается самопроизвольно. Система электроснабжения (СЭС) РФ, а также СЭС других стран, развивается. Внедряются интеллектуальные электрические сети (*Smart Grid*) [4], применяются дополнительные источники генерации на основе возобновляемых источников энергии [5, 6]. Такие решения приводят к сокращению расстояний для транспортировки электроэнергии. Вследствие чего возможно значительное увеличение токов короткого замыкания в СЭС. Одним из способов борьбы с большими токами - это применение токоограничивающих устройств. Выяснено, что в сетях 0,4 кВ предпочтение можно отдать ограничителям тока на основе ЖСП [7].

Экспериментальные исследования показывают, что время восстановления колеблется в достаточно широких пределах и может быть соизмеримо с половиной периода частоты сети [1-3, 8-10]. В связи с этим, во втором, третьем и последующих полупериодах процесс может повторяться до момента отключения цепи дополнительным коммутационным аппаратом. В этом отношении в литературных источниках имеются сведения о конструкциях и их исследованиях, позволяющих сделать выводы об их жизнеспособности и возможности получения практического выхода.

При создании ЖСП важным моментом является выбор жидкого металла для их конструкций. Металлов, имеющих температуру плавления, близкую к температуре окружающей среды, достаточно много. С точки зрения быстродействия желательно отдать предпочтение металлам с низким удельным сопротивлением. В [1] приводятся результаты исследований и сравнительный анализ нескольких металлов для плавкой вставки. В результате можно сказать, что предпочтительным материалом для плавкой вставки могут быть щелочные металлы.

Общим недостатком любой конструкции является то, что во время коммутационного процесса канал диэлектрической втулки ЖСП подвергается дуговой эрозии при каждом срабатывании. Устранить эрозию не представляется возможным в связи со значительной разницей между температурой плавления известных диэлектрических материалов и температурой плазмы электрической дуги.

Экспериментальные исследования ЖСП с втулкой из термостойкой вакуумплотной керамики на основе окиси бериллия с температурой плавления 2670 °С показали, что увеличение диаметра канала диэлектрической втулки произошло более чем в три раза (рис. 1) [1]. Испытания проводились в контуре с ударным током 50 кА и напряжении 240 В. В каждом опыте макетный образец подвергался воздействию тока короткого замыкания в течение одного полупериода. Число опытов равнялось пяти. ЖСП сохранял работоспособность после каждого опыта, но его токоограничивающие свойства ухудшались. Дуговая эрозия накладывает ограничение на коммутационный ресурс ЖСП. В условиях эксплуатации после первого КЗ параметры ЖСП могут измениться так, что не будут удовлетворять требованиям защиты элементов сети. В ряде случаев потребуется его замена. Дуговая эрозия препятствует созданию ЖСП многократного использования. Коммутационный ресурс может быть увеличен за счет применения материалов более стойких к воздействию электрической дуги, чем керамика на основе окиси бериллия. Это могут быть карбиды металлов и другие материалы с температурой плавления от 3000 до 4000 °С [11]. Однако сведений об их использовании в настоящее время не обнаружено.

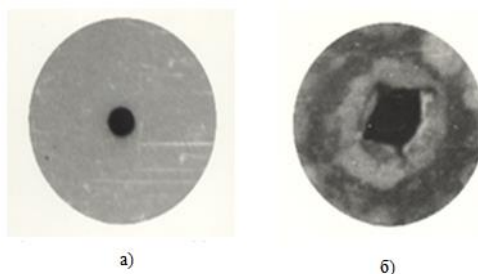


Рис. 1. Диэлектрическая втулка из BeO диаметром 20 мм: а – диэлектрическая втулка до испытания; б – диэлектрическая втулка после 5 испытаний при значении шунтирующего сопротивления 0,2 Ом.

Fig. 1. BeO 20 mm diameter dielectric bushing: а – dielectric bushing before test; б – The dielectric bushing after 5 tests with a shunt resistance of 0.2 ohms.

Коммутационный ресурс ЖСП может повышаться не только использованием материалов с повышенной стойкостью к воздействию электрической дуги. Он повышается как конструктивными [1, 12-14], так и схемными решениями [1, 15].

Схемное решение предполагает шунтирование ЖСП низкоомным резистором,

которое уменьшает энергию, выделенную в канале ЖСП во время дуговой стадии процесса [1, 13]. Часть энергии поглощается и рассеивается шунтирующим сопротивлением. Вариант использования ЖСП в комплексе с шунтирующим сопротивлением и дополнительным коммутационным аппаратом получил более полное научное обоснование и развитие. Научный задел в этом отношении более всего приближен к практическому выходу.

На рис. 2а представлена упрощенная модель предохранителя с повышенным коммутационным ресурсом [11]. Повышенный коммутационный ресурс достигается тем, что плавкая вставка выполнена из двух составных частей. Одна из них 2 выполнена из жидкого металла 2. Вторая часть представляет собой тугоплавкий электрод 1. Электрод является частью составной плавкой вставки. Он образует участок с повышенной по отношению к плавкой вставке температурой плавления и не разрушается при срабатывании ЖСП. При протекании по ЖСП аварийного тока быстрее нагреваются участки токоведущих частей с повышенным сопротивлением. Повышенным сопротивлением может обладать участок жидкометаллической части плавкой вставки в месте контакта с торцевой поверхностью электрода за счет сужения линий тока. При достижении температуры кипения часть жидкого металла в зоне контакта с электродом испаряется, обеспечивая разрыв электрической цепи с последующим гашением электрической дуги. Эрозия канала диэлектрической втулки 3 при этом присутствует. Это область 4 (рис. 2б).

Время срабатывания конструкции определяется проводимостью и сечением участка с повышенным сопротивлением. Изменение сечения жидкометаллической части плавкой вставки при дуговой эрозии стенок канала в данном случае не влияет на время срабатывания при коротком замыкании. Электрод обеспечивает сужение линий тока в жидкометаллической части плавкой вставки до сечения торцевой части. Образует участок, подобный узкому перешейку в обычной плавкой вставке. Сечение узкого перешейка не изменяется при коммутационных процессах. Время срабатывания также остается постоянным. Коммутационный ресурс такой конструкции определяется длиной электрода L_1 , которая уменьшается под действием электрической дуги в период каждой коммутации. См. рис. 2б. Конструкции с составной плавкой вставкой, одной из частей которой является тугоплавкий электрод, в литературе получили название жидкометаллический предохранитель со стабилизированной защитной характеристикой (ЖСПС).

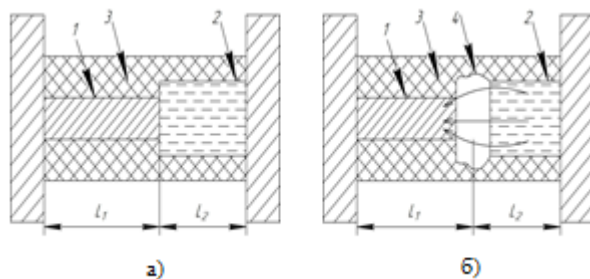


Рис. 2. Упрощенная модель предохранителя с составной плавкой вставкой: а – до испытания; б – после нескольких срабатываний. Где: 1 – электрод; 2 – жидкий металл; 3 – диэлектрическая втулка; 4 – зона эрозии; L_1 – длина электрода; L_2 – длина жидкометаллической вставки металла.

Коммутационные испытания [1] макетных образцов подтвердили, что довольно эффективным средством повышения коммутационного ресурса, стабилизации преддугового интеграла и интеграла отключения ЖСП является шунтирование его низкоомным резистором (См. рис. 3) (зависимость 2). При этом эффект еще больше повышается, если в суженной части канала диэлектрической втулки расположить тугоплавкий электрод (зависимость 3). Испытания проводились в контуре с током короткого замыкания 50 кА, напряжение 450 В. Диаметр суженной части плавкой вставки 0,7 мм. В качестве жидкого металла использовалась ртуть. Для ЖСПС с тугоплавким электродом из вольфрама от цикла к циклу закономерного увеличения величины пропускаемого тока и максимального тока через ЖСП от цикла к циклу не наблюдалось. Данные исследования показали, что при срабатывании ЖСП полностью отсутствуют коммутационные перенапряжения.

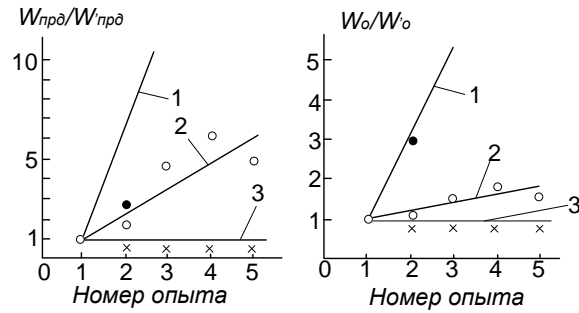


Рис. 3. Зависимость относительного значения преддугового интеграла и интеграла отключения от числа коммутаций ЖСП. Где: $W_{\text{прд}}$ – преддуговой интеграл ЖСП; $W'_{\text{прд}}$ – преддуговой интеграл ЖСП в первом опыте; W_0 – интеграл отключения ЖСП; W'_0 – интеграл отключения в первом опыте; 1 – включение ЖСП без шунтирующего сопротивления, 2 – с шунтирующим сопротивлением, 3 – с шунтирующим сопротивлением и при расположении в суженной части канала диэлектрической втулки вольфрамового электрода.

Fig. 3. Relationship between the relative value of the prearc integral and the integral of disconnection from the number of switches of the liquid metal self-healing fuse. Where: $W_{\text{прд}}$ – pre-arc integral liquid metal self-healing fuse; $W'_{\text{прд}}$ – the pre-arc integral of the liquid metal self-healing fuse in the first experiment; W_0 – the integral of switching off the self-healing fuse; W'_0 – the trip integral in the first experiment; 1 – switching on the liquid metal self-healing fuse without shunt resistance, 2 – with shunt resistance, 3 – with a shunt resistance and when the dielectric sleeve of the tungsten electrode is located in the narrowed part of the channel.

Материалы и методы

При существенных преимуществах конструкция с тугоплавким электродом обладает недостатком. Если за время протекания по плавкой вставке аварийного тока электрод успевает нагреваться до температуры плавления, происходит его разрушение. Это говорит об ограниченной коммутационной способности ЖСПС. На сколько этот недостаток ограничивает область применения ЖСПС? На сегодняшний день вопрос остается открытым. Возникает задача – найти и определить условия, при которых происходит это явление и возможности повышения коммутационной способности.

Необходимым условием работоспособности ЖСПС является превышение теплового интеграла плавления электрода $W_{\text{э}}$ над суммой преддугового интеграла плавкой вставки $W_{\text{прд}}$ и теплового интеграла W_0 от тока во время дуговой стадии процесса в ЖСПС.

$$W_{\text{э}} \geq W_{\text{прд}} + W_0. \quad (1)$$

Значение тепловых интегралов определяется по осциллограммам срабатывания ЖСПС.

$$W_{\text{прд}} = \int_0^{t_{\text{прд}}} i^2 dt, \quad W_0 = \int_{t_{\text{прд}}}^{t_{\text{дуги}}} i^2 dt, \quad (2)$$

где i – ток, протекающий через ЖСПС; $t_{\text{прд}}$ – преддуговое время; $t_{\text{дуги}}$ – время дуги.

Выполнение условия (1) означает, что электрод при срабатывании ЖСПС не достигнет температуры плавления.

Значения $W_{\text{э}}$ определяются по формуле:

$$W_{\text{э}} = A_{\text{э}} \cdot S_{\text{э}}^2, \quad (3)$$

где $S_{\text{э}}$ – сечение электрода.

Значение $A_{\text{э}}$ представляет собой энергию, необходимую для нагрева электрода до температуры плавления. Для таких тугоплавких материалов как вольфрам, рений, тантал значения рассчитывались по выражению [1]:

$$A = \frac{c_l \cdot \gamma_l}{\rho_0 \cdot \alpha} \cdot \ln \left(\frac{1 + \alpha \cdot T_{\text{пл}}}{1 + \alpha \cdot T_0} \right), \quad (4)$$

где c_l – теплоемкость материала электрода в твердом его состоянии; γ_l – плотность материала плавкой вставки; α – температурный коэффициент изменения сопротивления; ρ_0 – удельная

сопротивления материала плавкой вставки при температуре 0°C ; T_0 – температура окружающей среды; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления.

Результаты приведены в таблице 1.

Значение $W_{\text{прд}}$ для составной плавкой вставки прежде всего зависит от времени нагрева жидкого металла до температуры кипения и перехода в парообразное состояние. При этом возможны два случая. В одном из них при протекании аварийного тока часть жидкого металла в месте контакта с электродом нагревается раньше, чем электрод достигает указанной температуры. После чего происходит разрыв электрической цепи с последующим возникновением и гашением дуги. В другом случае электрод нагревается до температуры кипения жидкого металла раньше, чем нагревается жидкий металл. Тогда электрод нагревает жидкий металл и происходит испарение части жидкого металла в месте контакта с торцевой частью. Какой из этих случаев будет иметь место, зависит от теплофизических свойств, применяемых в составной плавкой вставке материалов.

Таблица 1

| Результаты расчета значений $A_{\text{э}}$ | | |
|--|--|---|
| Материал электрода | $A_{\text{ж}} \cdot 10^{16}, \frac{\text{Дж}}{\text{Ом} \cdot \text{м}^4}$ | $A_{\text{ж}}, \frac{\text{Дж}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^4}$ |
| Вольфрам | 2,12 | 21200 |
| Рений | 1,1 | 11042 |

В первом случае преддуговой интеграл будет равен:

$$W_{\text{прд}} = W_{\text{прд,ж}} = A_{\text{ж}} \cdot S_{\text{ж}}^2, \quad (5)$$

где $S_{\text{ж}}$ – сечение плавкой вставки из жидкого металла; $W_{\text{прд,ж}}$ – преддуговой интеграл плавкой вставки из жидкого металла.

Значение $A_{\text{ж}}$ представляет собой энергию, необходимую для нагрева жидкого металла до температуры кипения и превращения в парообразное состояние. Для плавких вставок из жидкого металла приводятся в технической литературе [1]. Во втором случае:

$$W_{\text{прд}} = W_{\text{прд,ж-э}} = A_{\text{ж-э}} \cdot S_{\text{э}}^2, \quad (6)$$

где $W_{\text{прд,ж-э}}$ – преддуговой интеграл нагрева электрода до температуры кипения жидкого металла.

Во втором случае постоянная $A_{\text{ж-э}}$ представляет собой энергию, необходимую для нагрева электрода до температуры кипения жидкого металла. Значение $A_{\text{ж-э}}$ определяется по выражению (4), в котором используются теплофизические константы материала электрода, кроме температуры плавления. Температура плавления принимается равной температуре кипения жидкого металла. Расчет $A_{\text{ж-э}}$ представлен в таблице 2.

Таблица 2

| Результаты расчета значений $A_{\text{ж-э}}$ | | | | | | | | | |
|---|----------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| Материал электрода | Вольфрам | | | Рений | | | Тантал | | |
| Жидкий металл | натрий | калий | ртуть | натрий | калий | ртуть | натрий | калий | ртуть |
| $A_{\text{ж-э}}, \frac{\text{Дж}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^4}$ | 10398 | 9536 | 5350 | 5183 | 4716 | 2533 | 4664 | 4265 | 2357 |

Преддуговой интеграл $W_{\text{прд}}$ при составной плавкой вставке будет равен меньшему значению из двух рассмотренных случаев (5) и (6).

$$W_{\text{прд}} = W_{\text{прд,ж-э}}, \text{ если } W_{\text{прд,ж-э}} \leq W_{\text{прд,ж}}; \quad (7)$$

$$W_{\text{прд}} = W_{\text{прд,ж}}, \text{ если } W_{\text{прд,ж-э}} \geq W_{\text{прд,ж}}. \quad (8)$$

Учитывая, что в составной плавкой вставке

$$S_{\text{э}} = S_{\text{ж}} = S, \quad (9)$$

при расчетах $W_{\text{прд}}$ для составной плавкой вставки окончательное значение постоянной

$A_{\text{вст}}$ выбирается следующим образом:

$$A_{\text{вст}} = A_{\text{Ж-Э}}, \text{ если } A_{\text{Ж-Э}} \leq A_{\text{Ж}}; \quad (10)$$

$$A_{\text{вст}} = A_{\text{Ж}}, \text{ если } A_{\text{Ж-Э}} \geq A_{\text{Ж}}. \quad (11)$$

Тогда

$$W_{\text{прд}} = A_{\text{вст}} \cdot S^2, \quad (12)$$

где S – сечение плавкой вставки из жидкого металла.

Результаты расчета $A_{\text{вст}}$ для составной плавкой вставки при использовании в качестве одной из частей вольфрама, а в качестве второй части натрия, калия и ртути представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты расчета значений $A_{\text{вст}}$ для составной плавкой вставки. материал электрода – вольфрам

| Жидкий металл | $A_{\text{Ж}}, \frac{\text{Дж}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^4}$ | $A_{\text{Ж-Э}}, \frac{\text{Дж}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^4}$ | $A_{\text{вст}}, \frac{\text{Дж}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^4}$ |
|---------------|---|---|---|
| натрий | 18000 | 10398 | 10398 |
| калий | 5800 | 9536 | 5800 |
| Ртуть | 1300 | 5350 | 1300 |

С учетом сказанного, условие (1) принимает вид:

$$A_{\text{Э}} \cdot S^2 \geq A_{\text{вст}} \cdot S^2 + W_{\text{д}}; \quad (13)$$

Ток короткого замыкания в ограничителе тока, состоящим из ЖСПС и шунтирующего сопротивления, в начальный момент времени протекает через ЖСПС, нагревая плавкую вставку. После достижения током значения, при котором тепловой интеграл достигнет значения преддугового интеграла ЖСПС за время $t_{\text{прд}}$ плавкая вставка вблизи электрода испаряется и возникает электрическая дуга, которая гасится при прохождении тока через нулевое значение. Электрическая цепь разрывается дополнительным коммутационным аппаратом. Длительность дуговой стадии процесса определяется временем $t_{\text{прд}}$. Возникновение электрической дуги сопровождается переключением части тока в цепь шунтирующего сопротивления.

Интеграл отключения ограничителя тока W_0 будет складываться из преддугового интеграла плавкой вставки и теплового интеграла $W_{\text{д-Р}}$ от тока, протекающего в цепи короткого замыкания в интервал времени от возникновения дуги и переключения части тока в цепь шунтирующего сопротивления до естественного перехода тока через нулевое значение.

$$W_0 = W_{\text{прд}} + W_{\text{д-Р}}. \quad (14)$$

Токи в цепи сопротивления электрической дуги и цепи шунтирующего сопротивления распределяются обратно пропорционально соотношению этих сопротивлений:

$$\frac{i_{\text{д}}}{i_{\text{Р}}} = \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{д}}}. \quad (15)$$

Отношение тока через сопротивление дуги к ограниченному ограничителем тока $i_{\text{д-Р}}$ в цепи короткого замыкания в интервал времени от возникновения дуги и переключения части тока в цепь шунтирующего сопротивления выглядит следующим образом:

$$\frac{i_{\text{д}}}{i_{\text{д-Р}}} = \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{д}} + R_{\text{ш}}}. \quad (16)$$

Сделав предположение, что отношение квадрата тока дуги к квадрату тока в защищаемой цепи после срабатывания ограничителя тока равно отношению их тепловых интегралов получим:

$$\frac{i_{\text{д}}^2}{i_{\text{д-Р}}^2} = \frac{W_{\text{д}}}{W_{\text{д-Р}}} = \frac{W_{\text{д}}}{W_0 - W_{\text{прд}}}. \quad (17)$$

После алгебраических преобразований (17) получим полное квадратное уравнение:

$$W_O = \frac{S^2 \cdot (A_{\Sigma} - A_{BC})}{\left(\frac{R_{III}}{R_d}\right)^2} + \frac{2 \cdot S^2 \cdot (A_{\Sigma} - A_{BC})}{\frac{R_{III}}{R_d}} + S^2 \cdot A_{\Sigma}. \quad (18)$$

Его решение представляется двумя вещественными корнями (19), (20):

$$\frac{R_{III}}{R_d} = \frac{\sqrt{(A_{BC} - A_{\Sigma})} \cdot \left(\sqrt{\left(A_{BC} - \frac{W_O}{S^2}\right)} - \sqrt{(A_{BC} - A_{\Sigma})} \right)}{\frac{W_O}{S^2} - A_{\Sigma}}; \quad (19)$$

$$\frac{R_{III}}{R_d} = \frac{\sqrt{(A_{BC} - A_{\Sigma})} \cdot \left(\sqrt{(A_{BC} - A_{\Sigma})} + \sqrt{\left(A_{BC} - \frac{W_O}{S^2}\right)} \right)}{A_{\Sigma} - \frac{W_O}{S^2}}. \quad (20)$$

Значение R_{III}/R_d по (17) имеет отрицательное значение и не представляет интереса. Для дальнейших рассуждений используем выражение (20).

Полученное выражение (20) позволяет получить графическую зависимость критических значений R_{III}/R_d от интеграла отключения W_O/S^2 . См. рис 4. В этой зависимости область, ограниченная осями графика и полученной зависимостью, представляет собой область значений W_O/S^2 и R_{III}/R_d , при которых обеспечивается работоспособность составной плавкой вставки. При срабатывании электрод не достигает температуры плавления, остается работоспособным. Другая область при значениях R_{III}/R_d выше критических говорит о том, что электрод будет разрушаться.

В качестве примера проверим работоспособность ограничителя тока с составной плавкой вставкой в цепи короткого замыкания. Предположим, что цепь короткого замыкания включает в себя ограничитель с последовательно включенным автоматическим выключателем с собственным временем срабатывания t соизмеримым с половиной периода частоты сети. Параметры ограничителя тока обеспечивают ограничение амплитуды возможного тока короткого замыкания до $I_{т,огр} = 28$ кА. Это значение является защитным показателем ограничителя тока. Интеграл отключения такого устройства можно оценить следующим образом:

$$W_O = \left(\frac{I_{т,огр}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot t = \left(\frac{28 \cdot 10^3}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot 0,01 = 4,0 \cdot 10^6 \text{ (A}^2\text{s)}$$

При сечении электрода 1 мм² W_O и W_O/S^2 по значению равны между собой. На рис. 4 видно, что этому значению, согласно зависимости 1, соответствует максимальное значение R_{III}/R_d равное 0,045. При значениях меньше указанного работоспособность ЖСПС обеспечивается. При более высоких значениях возможно расплавление электрода и нарушение работоспособности.

Из рис.4 следует, что повышать отключающую способность ЖСПС возможно за счет уменьшения R_{III}/R_d или увеличения сопротивления дуги R_d . Это достигается за счет повышения начального давления для жидкого металла. Повышенное начальное давление устанавливается за счет конструкции демпфирующего устройства. Для этого могут быть использованы механические пружины, сжатый газ и т.п. [11]. В настоящее время информация о исследованиях вольтамперной характеристики дуги в парах жидкого металла и ее сопротивления в литературных источниках пока отсутствует.

Зависимости могут оказаться полезными при разработке конструкций ЖСПС. Например, при выборе материала электрода и жидкого металла и т.п.

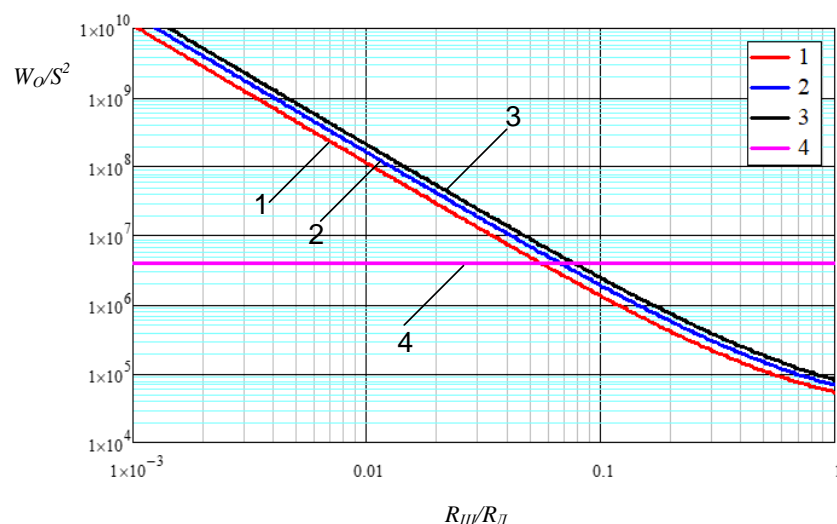


Рис. 4. Зависимость $R_{ш}/R_{д}=f(W_0/S^2)$ для составной плавкой вставки ЖСПС. Материал электрода – вольфрам. Зависимость 1 – материал вставки натрия. Зависимость 2 – материал вставки калий. Зависимость 3 – материал вставки ртути.

Fig. 4. Dependency $R_{ш}/R_{д}=f(W_0/S^2)$ for a composite fusion insert. Electrode material – wolfram. Dependency 1 – fusible insert material sodium. Dependency 2 – fusible insert material potassium. Dependency 3 – fusible insert material mercury

Выводы

1. На сегодняшний день можно говорить о ЖСП как ограничителе тока при последовательном включении с дополнительным коммутационным аппаратом. В этом отношении в литературных источниках имеются сведения о конструкциях и их исследованиях, позволяющих сделать выводы о их жизнеспособности и возможности получения практического выхода.

2. Общим недостатком ЖСП конструкции является то, что во время коммутационного процесса канал диэлектрической втулки ЖСП подвергается дуговой эрозии при каждом срабатывании. Дуговая эрозия препятствует созданию ЖСП многократного использования. Коммутационный ресурс может быть увеличен за счет применения материалов более стойких к воздействию электрической дуги.

3. Схемное решение предполагает шунтирование ЖСП низкоомным резистором, которое уменьшает энергию, выделенную в канале ЖСП во время дуговой стадии процесса.

4. Значительным эффектом повышения коммутационного ресурса и стабильности защитной характеристики обладает конструкция ЖСПС с составной плавкой вставкой. Одна из частей выполнена из жидкого металла. Вторая часть представляет собой тугоплавкий электрод.

5. При значительных преимуществах конструкция с тугоплавким электродом обладает существенным недостатком – ограниченной коммутационной способностью по причине возможного разрушения электрода под действием тока короткого замыкания. Возникает задача – найти и определить условия, при которых происходит это явление и возможности повышения коммутационной способности.

6. Главным критерием работоспособности ЖСПС является величина соотношения значения шунтирующего сопротивления и сопротивления электрической дуги. Работоспособность обеспечивается при значениях этой величины ниже критических.

7. Математическое выражение расчета критических значений соотношения сопротивлений в зависимости от защитного показателя устройства может быть использовано на практике для оценки работоспособности ЖСПС.

8. Для повышения коммутационной способности ЖСПС при их разработке следует стремиться к увеличению сопротивления электрической дуги за счет повышения начального давления жидкого металла.

9. Предложенное математическое выражение может оказаться полезными при разработке конструкций ЖСПС. Например, при выборе материала электрода и жидкого металла и т.п.

Литература

1. Кузнецов А.В. Жидкометаллические предохранители и инвестиционная привлекательность их разработки. М.: Энергоатомиздат, 2006. 207 с.

2. Voronin A.A., Kireev K.V., Kulakov P.A., et al. Experience in the Application of Liquid-Metal Working Medium in High-Current Commutators and Contact Joints // Russian Electrical Engineering. 2008. V. 79. N. 8. pp.415 – 419.
3. Кужеков С.Л., Васильев Б.Н., Куров Н.Н. Оценка быстродействия жидкометаллического самовосстанавливающегося предохранителя // Изв. высших учебных заведений. электромеханика. 2012. №2. С.134-136.
4. Смоленцев Н. И., Четошников Л. М. Топология электрической сети и способ передачи электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 4. С. 95-103.
5. Четошников Л. М., Смоленцев Н. И., Четошников С. А., и др. Автономные системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии и умной сетью // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 5-6. С. 3-10.
6. Николаев Ю. Е., Осипов В. Н., Игнатов В. Ю. Методика расчета энергетических показателей автономного энергокомплекса, включающего ГТУ, ВЭУ и аккумуляторы электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 3. С. 36-43.
7. Kuznetsov A.V., Yurenkov Y. P., Mityaev A. A. The Problem of Short-circuit Current Limitation in Energy-saving Systems of Transportation and Electricity Distribution // 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). 2021. pp. 1-5.
8. B. Wang, H. He, Y. Wu, et al. Liquid Metal Fault Current Limiter for DC Power Systems // 2020 4th International Conference on HVDC (HVDC). 2020. pp. 1084-1088.
9. Mingzhe Rong, Zhuo Yang, Qing Wan, et al. Investigation of Liquid Metal Current Limiter for MVDC Power System // Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST) 2019 5th International Conference on. 2019. pp. 408-411.
10. H. He, Y. Wu, Zhuo Yang, et al. Study of Liquid Metal Fault Current Limiter for Medium-Voltage DC Power Systems // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2018. vol. 8. no. 8. pp. 1391-1400.
11. Kurbatkina V.V., Patsera E.I., Levashov E.A., et al. Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Single-Phase Binary Tantalum-Hafnium Carbide (Ta, Hf) C and its Consolidation By Hot Pressing And Spark Plasma Sintering // Ceramics International. 2018. V. 44. № 4. P. 4320-4329.
12. Кузнецов А.В., Сычева И.В. Жидкометаллический самовосстанавливающийся ограничитель тока. Патент 2242818 (RU), МКИЗ 7Н01Н. №2003122171/09; Заявл. 15.07.03; Опубл. 20.12.04, Бюл. 35. 4 с. 87/00.
13. Приходченко В.И., Серпуховитин М.Е., Скрипачев М.О., и др. Жидкометаллический токоограничитель // Известия вузов. Электромеханика. 2011. №3. С.60-62.
14. Кужеков С.Л., Васильев Б.Н., Куров Н.Н. Конструктивные особенности жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей и их влияние на процессы, протекающие в них // Изв. вузов. Электромеханика. Специальный выпуск. 2010. С. 53 -55.
15. Кузнецов А.В., Юренков Ю.П. Токоограничивающее устройство. Патент 2713641 C1 (RU), МКИЗ H02H. №2019124807; Заявл. 02.08.19; Опубл. 05.02.20, Бюл. 4. 8 с. 3/08, 9/02.

Авторы публикации

Кузнецов Анатолий Викторович – д-р. техн. наук., профессор, заведующий кафедры «Электроснабжение», Ульяновский государственный технический университет.

Юренков Юрий Петрович – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение», Ульяновский государственный технический университет.

References

1. Kuznetsov AV. *Liquid Metal Fuse and Investment Attractiveness of Their Development*. Energoatomizdat. Moscow. 2006. p. 297.
2. Voronin AA, Kireev KV, Kulakov PA, et al. Experience in the Application of Liquid-Metal Working Medium in High-Current Commutators and Contact Joints. *Russian Electrical Engineering*. 2008;79(8):415-419. Available at URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13576205>
3. Kuzhekov SL, Vasiliev BN, Kurov NN. Design features of liquid metal self-healing fuses

and their influence on the processes occurring in them. News of universities. *Electromechanics. Special Issue*. 2010;53 -55. Available at URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17783697>

4. Smolencev NI, Chetoshnikova LM. Electric network topology and method of transmission of electric energy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(4):95-103. Available at URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41450788>.

5. Chetoshnikova LM, Smolencev NI, Chetoshnikov SA, et al. Autonomous power supply systems with renewable sources of energy and smart grid. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(5-6):3-10. Available at URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35418838>

6. Nikolaev YE, Osipov VN, Ignatov VY. Calculation methodology of the energy indicators of an self-contained energy complex including gas turbine plants, wind-driven power plant and electric storage. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(3):36-43. Available at URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43871158>.

7. Kuznetsov AV, Yurenkov YP, Mityaev AA. *The Problem of Short-circuit Current Limitation in Energy-saving Systems of Transportation and Electricity Distribution*. 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). 2021:1-5. Available at doi: 10.1109/ATEE52255.2021.9425327.

8. Wang B, He H, Wu Y, et al. *Liquid Metal Fault Current Limiter for DC Power Systems*. 2020 4th International Conference on HVDC (HVDC). 2020:1084-1088. Available at doi: 10.1109/HVDC50696.2020.9292867.

9. Rong M, Yang Z, Wan Q, et al. *Investigation of Liquid Metal Current Limiter for MVDC Power Systems*. Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST) 2019 5th International Conference on. 2019:408-411. Available at doi: 10.1109/ICEPE-ST.2019.8928693

10. He H, Wu Y, Yang Z, et al. *Study of Liquid Metal Fault Current Limiter for Medium-Voltage DC Power Systems*. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2018;8(8):1391-1400. Available at doi: 10.1109/TCPMT.2018.2791435.

11. Kurbatkina VV, Patsera EI, Levashov EA, et al. Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Single-Phase Binary Tantalum-Hafnium Carbide (Ta,Hf)C and its Consolidation By Hot Pressing And Spark Plasma Sintering. *Ceramics International*. 2018;44(4):4320-4329. doi.: 10.1016/j.ceramint.2017.12.024

12. Kuznetsov AV, Sycheva IV. Liquid metal self-healing current limiter. Patent 2242818 (RU), МКИ3 7H01H. №2003122171/09; Date of filing: 15.07.03; Date of publ. 20.12.04, Bull. 35. 4 p. 87/00. Available at URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37933700>

13. Prikhodchenko VI, Serpukhovitin ME, Skripachev MO, et al. Liquid metal current limiter. News of universities. *Electromechanics*. 2011;3:60-61. Available at URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16457983>.

14. Kuzhekov SL, Vasiliev BN, Kurov NN. Performance evaluation of a self-resetting liquid metal fuse. News of universities. *Electromechanics*. 2012;2:134-136. Available at URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35586766>.

15. Kuznetsov AV, Yurenkov YP. *Current limiting device*. Patent 2713641 C1 (RU), МКИ3 H02H. №2019124807; Date of filing: 02.08.19; Date of publ. 05.02.20, Bull. 4. 8 p. 3/08, 9/02. Available at URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42451467>.

Authors of the publication

Anatoliy V. Kuznetsov – Department of the Ulyanovsk state technical University.

Yuriy P. Yurenkov – Department of the Ulyanovsk state technical University.

| | |
|------------------------|---------------------|
| Получено | 19.10.2021г. |
| Отредактировано | 26.10.2021г. |
| Принято | 26.10.2021г. |