

УДК 621.316.13:621.3.064:621.316.923.6

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТИ С ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ НА ОСНОВЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ

*А.В. Кузнецов, Ю.П. Юренков*

Ульяновский государственный технический университет  
Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

E-mail: kav2@ulstu.ru; alxim2@mail.ru

**Аннотация.** Показано, что высокое быстродействие и токоограничивающие свойства ЖСП вызывают интерес в их использовании в системах электроснабжения. Однако уровень исследований как в нашей стране, так и за рубежом не позволяет перейти к созданию промышленных образцов ЖСП. Наиболее полное научное обоснование в технической литературе получил вариант использования ЖСП в комплексе с шунтирующим сопротивлением для ограничения токов короткого замыкания, подобно токоограничивающему реактору. Однако математическая модель, посредством которой получены имеющиеся результаты, несовершенна.

Для исследования процесса короткого замыкания в сети переменного тока предложена новая математическая модель, которая в отличие от известной позволяет более качественно исследовать токоограничивающие свойства устройства на основе ЖСП. Модель учитывает сопротивление электрической дуги во время коммутационного процесса. Период времени горения дуги может быть разделен на бесконечно малые участки, сопротивление дуги на каждом из которых принято линейным.

Сравнение результатов расчета с осциллограммой, полученной в результате эксперимента, показывает их полное совпадение, что подтверждает адекватность предложенной математической модели физическим процессам в цепи короткого замыкания с ЖСП.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, математическая модель, устройство защиты, процесс короткого замыкания, жидкометаллический самовосстанавливающийся предохранитель, токоограничивающее устройство на основе жидкометаллического самовосстанавливающегося предохранителя.

Уровень исследований жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей (ЖСП) на сегодняшний день как в РФ, так и за рубежом не позволяет разработать промышленные образцы для использования в системах электроснабжения. Такие исследования проводятся отдельными инициативными группами в разных странах мира – Японии, США, Германии, Китае, РФ и др. [1–9]. На сегодняшний день установлено [1, 3, 10, 11, 12], что ЖСП и устройства на их основе обладают более высокими токоограничивающими свойствами и быстродействием, чем освоенные промышленностью электрические аппараты.

---

*Кузнецов Анатолий Викторович (д.т.н., с.н.с.), заведующий кафедрой «Электроснабжение».*

*Юренков Юрий Петрович, ассистент кафедры «Электроснабжение».*

Это вызывает интерес и потребность в развитии и продолжении исследований в направлении создания макетных и промышленных образцов ЖСП и определения области их применения.

Жидкометаллический самовосстанавливающийся предохранитель (ЖСП) – это электрический аппарат, в котором в качестве плавкого элемента применяется жидкий металл (индий, галлий, ртуть, щелочные металлы и т. п.), расположенный в канале диэлектрической втулки. При протекании по жидкометаллической плавкой вставке тока короткого замыкания (КЗ) она испаряется, вызывая взрывообразное повышение давления. При высоком давлении пары металла обладают значительным сопротивлением. В результате ток резко ограничивается, после чего в канале образуется электрическая дуга, которая гасится при естественном переходе тока через нулевое значение. После остывания и конденсации паров жидкого металла электрическая цепь восстанавливается. Экспериментальные исследования показывают, что время восстановления колеблется в достаточно широких пределах и может быть соизмеримо с половиной периода частоты сети [1, 13]. В этой связи во втором, третьем и последующих полупериодах процесс может повторяться до момента отключения цепи дополнительным коммутационным аппаратом.

Конструкции ЖСП, у которых время восстановления может задерживаться до вмешательства дежурного персонала или средств автоматики, имеются [1]. 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. Кроме того, исследования показывают, что во время коммутационного процесса канал диэлектрической втулки ЖСП подвергается дуговой эрозии при каждом срабатывании [1]. Устранить эрозию не представляется возможным в связи со значительной разницей между температурой плавления известных диэлектрических материалов и температурой плазмы электрической дуги.

Экспериментальные исследования ЖСП со 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 [1]. Испытания проводились в контуре с ударным током 50 кА и напряжением 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 [14]. Однако сведений об их использовании в настоящее время не обнаружено.

Коммутационный ресурс ЖСП может повышаться не только использованием материалов с повышенной стойкостью к воздействию электрической дуги. Он повышается как конструктивными [1, 2], так и схемными решениями. Схемное решение предполагает шунтирование ЖСП низкоомным резистором, которое

уменьшает энергию, выделенную в канале ЖСП во время дуговой стадии процесса. 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.

ЖСП в комплексе с шунтирующим сопротивлением может найти применение для ограничения токов КЗ в электрической сети [1, 3]. В настоящее время для ограничения токов КЗ в сетях используются токоограничивающие реакторы и согласующие трансформаторы с повышенным напряжением короткого замыкания. Они позволяют избежать превышения номинальных параметров элементов сети, вызванного термическим и динамическим воздействием тока КЗ; использовать в сети коммутационную аппаратуру с предельной отключающей способностью ниже возможного тока КЗ; вместо дорогих выключателей с высокой отключающей способностью использовать выключатели с пониженной отключающей способностью и т. п. К сожалению, реакторы и согласующие трансформаторы создают дополнительные потери электроэнергии в нормальном режиме, обусловленные активным сопротивлением их обмоток. Применение токоограничивающих устройств на основе ЖСП позволяет снизить эти потери электроэнергии в сети.

В [1] содержатся результаты параметрического синтеза устройства на основе ЖСП, включающие в себя расчет геометрии плавкой вставки, расчет значения шунтирующего сопротивления в соответствии с требованиями защиты элементов защищаемой электрической сети, вывод выражения для определения коэффициента чувствительности и т. п. Все эти результаты получены на основе исследования математической модели, в которой сопротивление ЖСП как на стадии образования паров жидкого металла в канале диэлектрической втулки, так и на стадии горения дуги принято равным бесконечности. Следовательно, на этой стадии ток КЗ ограничивается шунтирующим сопротивлением. В ряде конкретных случаев это можно допустить.

В общем же случае сопротивление электрической дуги может быть соизмеримо со значением величины шунтирующего сопротивления. В период дуговой стадии процесса ток КЗ будет ограничиваться параллельно включенными сопротивлениями. Одно из них – шунтирующее сопротивление, второе – сопротивление электрической дуги. Результирующее сопротивление будет меньше, чем шунтирующее сопротивление. Ток в сети увеличится по сравнению с током, определенным по модели. Использование модели [1] может привести к ошибкам при разработке, проектировании и применении токоограничивающих устройств на основе ЖСП. Требуется расширение функциональных возможностей модели.

Новая модель включает в себя схему замещения сети с токоограничивающим устройством на основе ЖСП в режиме КЗ (рис. 1). Она состоит из источника переменного напряжения  $G$ , коммутационного аппарата  $Q_1$ , индуктивности сети  $L$ , активного сопротивления сети  $R$ , сопротивления плавкой вставки ЖСП  $R_F$ , сопротивления дуги  $R_d$ , возникающей при срабатывании ЖСП, шунтирующего сопротивления  $R_{SH}$ . Положение ключа  $Q_1$  «замкнуто» соответствует возникновению тока КЗ и его протеканию в сети, положение ключа  $Q_1$  «разомкнуто» – его прекращению. Предложенная модель предусматривает отключение тока КЗ (размыкание ключа  $Q_1$ ) в момент второго естественного перехода через ноль. При использовании быстродействующих коммутационных аппаратов рассматривать

процесс короткого замыкания в течение времени большего периода частоты сети нецелесообразно. При применении аппаратов с большим или меньшим временем действия в модель можно внести поправки.

За время от возникновения КЗ до второго естественного перехода тока через ноль проходит семь основных этапов процесса. Каждый этап на схеме замещения (см. рис. 1) соответствует состоянию ключа  $Q_2$  в определенном положении – 1, 2 или 3. На любом из этапов цепь КЗ проходит через индуктивность сети и активное сопротивление  $R_K$ , значение которого определяется состоянием ключа  $Q_2$ .

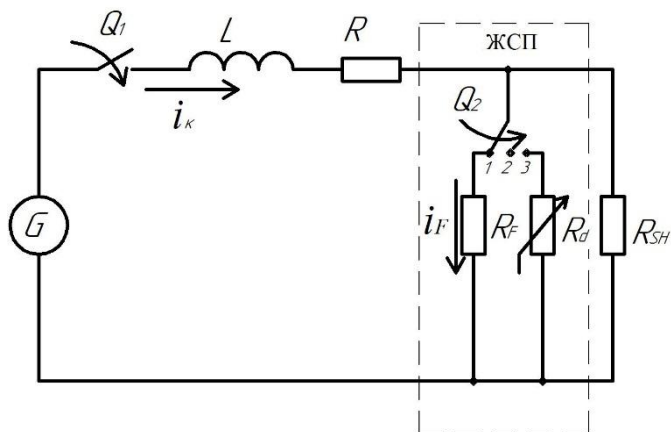


Рис. 1. Эквивалентная схема процесса короткого замыкания в сети с токоограничивающим устройством на основе ЖСП:

$i_K$  – ток КЗ;  $i_F$  – ток, протекающий через ЖСП

На первом этапе ключ  $Q_2$  находится в состоянии 1. При замыкании ключа  $Q_1$  происходит включение токоограничивающего устройства на КЗ. Так как шунтирующее сопротивление велико по сравнению с сопротивлением ЖСП, ток  $i_K$  КЗ проходит через плавкую вставку, сопротивление которой принято равным нулю. В данном случае  $i_K = i_F$  (см. рис. 1) активное сопротивление цепи короткого замыкания  $R_K$  представляет собой активное сопротивление источника  $R_K = R$ . Длительность этапа  $\Delta t_1$  определяется периодом  $0 \leq t \leq t_1$ , где  $t_1$  – время, включающее в себя время нагрева плавкой вставки до температуры кипения, время перехода из жидкого состояния в парообразное. Это время предшествует образованию высокоомного сопротивления паров металла и возникновению электрической дуги. Используя терминологию для обычных плавких вставок, назовем это время преддуговым:

$$t_{prd} = t_1. \quad (1)$$

Оно определяется как время, за которое текущее значение теплового интеграла

$$W = \int i_F^2 dt \quad (2)$$

от протекающего через ЖСП тока  $i_F$  достигнет значения, равного значению преддугового интеграла  $W_{prd}$ :

$$W = W_{prd} = A \cdot S^2. \quad (3)$$

В выражении (3)  $S$  – минимальное сечение плавкой вставки;  $A$  – постоянная для материала плавкой вставки величина [1]. Уравнения (2), (3) решаются относительно  $t$  численными методами. При изменении текущего значения  $i_K = i_F$  на каждом шаге итерационного процесса вычисляют текущее значение  $W$  и сравнивают его с  $W_{prd}$ . При выполнении условия (3) текущее значение  $t$  приравнивают  $t_1$ . Решение найдено, если различие между  $W$  и  $W_{prd}$  не превышает заданной погрешности. Значение тока  $i_K = i_F$  при этом представляет собой ограниченный ЖСП ток КЗ (пропускаемый ток).

Второй этап процесса происходит на интервале времени  $t_1 < t \leq t_2$ . На этом этапе в образовавшихся в результате нагрева плавкой вставки парах жидкого металла начинается образование электрической дуги. В некоторых литературных источниках этот этап называют переходной фазой предварительного образования дуги [15]. Процесс предварительного образования дуги плохо изучен даже в обычных плавках предохранителях. В большей степени то же можно сказать и про ЖСП. Многие модели этот этап не учитывают, что может привести к определенным погрешностям. Авторами предлагается представить процесс на этом этапе упрощенно – как возникновение паровой пробки, обладающей высоким сопротивлением, резко ограничивающим ток короткого замыкания. В конце этапа приложенное напряжение вызывает пробой образовавшейся паровой пробки и образование электрической дуги.

В соответствии с предположением на этом этапе электрическая ветвь с ЖСП разрывается, что эквивалентно переключению ключа  $Q_2$  из положения 1 в положение 2 (см. рис. 1). Активное сопротивление цепи КЗ  $R_K = R + R_{SH}$ . Ток КЗ ограничивается шунтирующим сопротивлением. Длительность второго этапа  $\Delta t_2$  определяется длительностью существования паровой пробки.

Третий этап происходит на интервале времени от  $t_2$  до  $t_3$ . На этом этапе в начальный момент времени происходит пробой паровой пробки и возникновение электрической дуги, что эквивалентно переключению ключа  $Q_2$  из положения 2 в положение 3. В конце этапа в момент времени  $t_3$ , соответствующий естественному переходу тока через нуль, электрическая дуга гасится. Время окончания третьего этапа определяется путем контроля вычисленных значений тока в итерационном процессе и сравнения их с нулевым значением. Нулевое значение тока соответствует времени окончания третьего этапа. Длительность этапа составляет время, равное  $\Delta t_3$ . Часть тока КЗ на этом этапе течет через сопротивление дуги в ЖСП, другая часть – через шунтирующее сопротивление. Ток КЗ ограничивается двумя параллельно включенными сопротивлениями  $R_d$  и  $R_{SH}$ .

Сопротивление электрической дуги  $R_d$  является нелинейным. Оно зависит от тока и приложенного к ЖСП напряжения  $U_{SH}$ . Сделав предположение о том, что это сопротивление не изменяется при изменении напряжения  $U_{SH}$  в течение бесконечно малого интервала времени  $\Delta t$ , соответствующего шагу разбиения всего времени этапа на  $n$  частей, можно процесс КЗ на этом этапе представить в соответствии со схемой замещения, изображенной на рис. 2. В этой схеме нелинейное сопротивление  $R_d$  представлено набором линейных сопротивлений

$R_{d,j}$ , поочередно включаемых в цепь с помощью ключа  $Q_3$  с промежутком времени  $\Delta t$ .

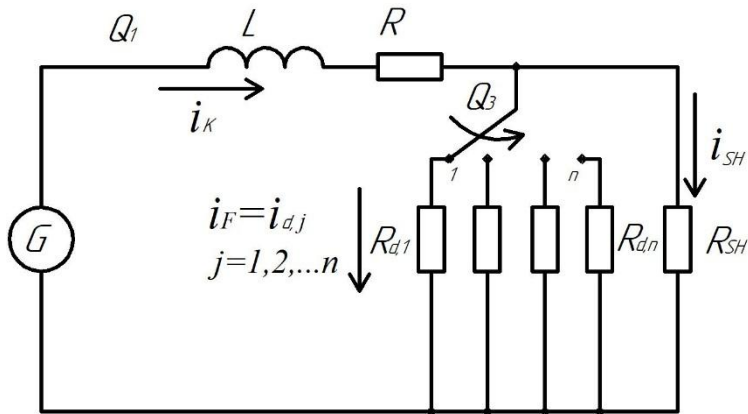


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения дугового этапа

На третьем этапе на каждом  $j$ -том его интервале  $\Delta t_{3,j}$  активное сопротивление цепи короткого замыкания  $R_K$  состоит из двух последовательно соединенных участков. Один из них – сопротивление источника  $R$ , второй представляет собой параллельное соединение сопротивлений  $R_{SH}$ ,  $R_{d,j}$ . В таком случае

$$R_K = R_{K,j} = R + \frac{R_{SH} \cdot R_{d,j}}{R_{SH} + R_{d,j}}.$$

Четвертый этап процесса происходит в интервале времени от  $t_3$  до  $t_4$ . Длительность этапа представляет собой время восстановления ЖСП. На этом этапе пары металла образуют высокоомное сопротивление. Ветвь с ЖСП разорвана. В начале этапа ключ  $Q_2$  (см. рис. 1) переходит из состояния 3 в состояние 2. Активное сопротивление цепи КЗ равно  $R_K = R + R_{SH}$ . Окончание этапа длительностью  $\Delta t_4$  связано с остыванием и конденсацией паров жидкого металла.

В начале пятого этапа ЖСП восстанавливается, его сопротивление стремится к нулю. Ключ  $Q_2$  из состояния 2 переходит в состояние 1. Происходит повторное включение ЖСП на КЗ. Этап 5 и последующие этапы 6 и 7 протекают по аналогии с этапами 1, 2, 3. Состояние ключа  $Q_2$ , активные сопротивления цепи КЗ на этих этапах полностью идентичны. Пятый, шестой и седьмой этапы проходят на временных интервалах  $t_4 < t \leq t_5$ ,  $t_5 < t \leq t_6$ ,  $t_6 < t \leq t_7$  соответственно. Длительность каждого из них составляет  $\Delta t_5$ ,  $\Delta t_6$ ,  $\Delta t_7$ . Седьмой этап закончится при гашении электрической дуги во время естественного перехода тока через ноль, после чего следует отключение цепи короткого замыкания ключом  $Q_1$ .

В итоге получилось, что процесс короткого замыкания разбит на ряд следующих друг за другом отрезков времени:  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ , соответствующих длительности первого и второго этапа процесса; отрезков  $\Delta t_{3,j}$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ), каждый из которых представляет собой часть этапа 3 дуговой стадии процесса в первом полу-периоде;  $\Delta t_4, \Delta t_5, \Delta t_6$ , соответствующих четвертому, пятому и шестому этапу

процесса;  $\Delta t_{7,j}$  ( $j = 1, 2 \dots n$ ), каждый из которых представляет собой часть этапа 7 дуговой стадии процесса во втором полупериоде.

В общем случае на любом отрезке времени процесса короткого замыкания, порядковый номер которого обозначен как  $l$ , уравнение переходного процесса выглядит следующим образом:

$$U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) = L \frac{di}{dt} + R_{K,l} \cdot i_k, \quad (4)$$

где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения источника;

$\psi$  – начальная фаза источника в момент замыкания ключа  $Q_1$ ;

$L$  – индуктивность сети;

$R_{K,l}$  – активное сопротивление цепи короткого замыкания, соответствующее рассматриваемому отрезку времени под номером  $l$ .

Решение уравнений на каждом отрезке времени процесса короткого замыкания имеет вид

$$i_k = I_{l,m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \varphi_l) - [I_{l,n} - I_{l,m} \cdot \sin(\omega \cdot t_{l,n} + \psi - \varphi_l)] \cdot e^{-\frac{t-t_{l,n}}{\tau_l}}, \quad (5)$$

где  $t_{l,n}$  – время начала отрезка времени под номером  $l$ ;

$t_{l,k}$  – время окончания отрезка времени под номером  $l$ ;

$\tau_l$  – постоянная времени цепи короткого замыкания, соответствующая каждому отрезку времени под номером  $l$ :

$$\tau_l = \frac{L}{R_{K,l}} = \frac{1}{\left(\frac{R_{K,l}}{\omega L}\right) \cdot \omega}; \quad (6)$$

$\varphi_l$  – угол сдвига фаз между током и напряжением в цепи короткого замыкания с параметрами, соответствующими каждому отрезку времени под номером  $l$  в установившемся режиме:

$$\varphi_l = \arctg \frac{1}{\frac{R_{K,l}}{\omega L}}; \quad (7)$$

$I_{l,m}$  – предполагаемая амплитуда тока установившегося режима в цепи короткого замыкания с параметрами, соответствующими каждому отрезку времени под номером  $l$ :

$$I_{l,m} = \frac{U_m}{Z_{K,l}}, \text{ где } Z_{K,l} = \sqrt{R_{K,l}^2 + (\omega L)^2}. \quad (8)$$

Значение тока в начале каждого отрезка времени под номером  $l$  равняется значению тока в конце предыдущего отрезка времени под номером  $(l-1)$ . Выражение для определения этой величины имеет следующий вид:

$$I_{l,m} = I_{(l-1),k} = I_{(l-1),m} \cdot \sin(\omega t_{(l-1),k} + \psi - \varphi_{(l-1)}) - \\ - \left[ I_{(l-1),n} - I_{(l-1),m} \cdot \sin(\omega t_{(l-1),n} + \psi - \varphi_{(l-1)}) \right] \cdot e^{-\frac{t_{(l-1),k} - t_{(l-1),n}}{\tau_{(l-1)}}}. \quad (9)$$

При этом на первом отрезке времени при  $l=1$ ,  $I_{(l-1),нач} = 0$ .

В выражении (9):

$t_{(l-1),n}$  – время начала отрезка времени по номером  $(l-1)$ ;

$t_{(l-1),k}$  – время окончания отрезка времени  $(l-1)$ .

При этом  $t_{(l-1),n} = t_{(l-2),k}$ ,  $t_{(l-1),k} = t_{l,n}$ .

Выражение для напряжения на  $R_{SH}$  на любом отрезке времени  $l$  имеет следующий вид:

$$u_{SH} = i_K \cdot (R_{K,l} - R). \quad (10)$$

Описанные выше уравнения представляют собой математическую модель процесса КЗ в сети с токоограничивающим устройством на основе ЖСП. Результаты расчета при использовании математической модели представлены на рис. 3. Результаты представлены в виде зависимостей тока в сети  $i_K = f(t)$ , тока через ЖСП  $i_F = f(t)$ , тока через шунтирующее сопротивление  $i_{SH} = f(t)$ , а также падения напряжения на шунтирующем сопротивлении  $U_{SH} = f(t)$  от времени с учетом рассмотренных этапов процесса. Параметры сети в схеме замещения в тестовом примере соответствуют напряжению источника  $240 \text{ В}$  (действующее значение),  $\cos \varphi = 0.19$ , значению максимального ударного тока КЗ  $52,6 \text{ кА}$  при начальной фазе напряжения источника  $\psi = 90^\circ$ .

При расчетах в схеме замещения использовались параметры ЖСП с номинальным током  $60 \text{ А}$ , с плавкой вставкой из ртути, с узким перешейком диаметром  $0,7 \text{ мм}$ . Величина шунтирующего сопротивления принята равной  $0,2 \text{ Ом}$ .

Интервалы времени каждого из этапов процесса КЗ подобраны так, чтобы их можно было отчетливо различить на рисунке. В таком случае полученные расчетные зависимости могут наглядно продемонстрировать характер процесса на каждом временном интервале. Линии не будут сливаться, мелкие детали рисунка будут отсутствовать. Длительность каждого этапа процесса обозначена на рисунке как  $\Delta t_i$  ( $i=1,2,3,4,5,6,7$ ). Время существования паровой пробки  $\Delta t_2$  в первом полупериоде и  $\Delta t_4$  во втором выбрано равным  $1,8 \text{ мс}$ . Период времени горения дуги  $\Delta t_3$  и  $\Delta t_7$  в первом и во втором полупериодах разделен на 4 интервала  $\Delta t_{3,1}, \Delta t_{3,2}, \Delta t_{3,3}, \Delta t_{3,4}$  и  $\Delta t_{7,1}, \Delta t_{7,2}, \Delta t_{7,3}, \Delta t_{7,4}$  соответственно. Длительность каждого из них составляет  $2 \text{ мс}$ ,  $2 \text{ мс}$ ,  $2 \text{ мс}$  и  $1,2 \text{ мс}$ .

Сопротивления дуги ЖСП на каждом из интервалов этапа горения дуги выбраны соизмеримыми с значением шунтирующего сопротивления. Такой выбор сделан для того, чтобы на графических зависимостях можно было увидеть распределение тока КЗ между параллельно включенными сопротивлениями дуги и шунтирующим сопротивлением. При значительной разнице в сопротивлениях распределение тока может быть незаметным. Сопротивление дуги на интервалах  $\Delta t_{3,1}, \Delta t_{3,2}, \Delta t_{3,3}, \Delta t_{3,4}$  и  $\Delta t_{7,1}, \Delta t_{7,2}, \Delta t_{7,3}, \Delta t_{7,4}$  принято равным  $7 \cdot R_{SH}$ ,  $6 \cdot R_{SH}$ ,  $4 \cdot R_{SH}$ ,  $6 \cdot R_{SH}$  соответственно.



Анализ расчетных зависимостей (см. рис. 3) говорит о следующем. На всех участках процесса КЗ токи в сети  $i_K = f(t)$  и ее ветвях  $i_F = f(t)$ ,  $i_{SH} = f(t)$  изменяются в соответствии с математическим описанием. При включении ЖСП на короткое замыкание ток  $i_K = i_F = f(t)$  возрастает до значения  $1,7 \text{ кА}$  на первом этапе процесса и  $2,2 \text{ кА}$  на пятом этапе процесса, не достигая ударного значения, равного  $52,6 \text{ кА}$ . Результаты получены по (2), (3). На этих этапах ток  $i_{SH} = f(t)$  в цепи с шунтирующим сопротивлением  $R_{SH}$  и напряжение  $U_{SH} = f(t)$  на нем отсутствуют.

В период дуговой стадии процесса (этапы 3 и 7) наблюдаются скачкообразные изменения токов  $i_F = f(t)$ ,  $i_{SH} = f(t)$  на границах временных интервалов. Это связано с тем, что происходит скачкообразное изменение сопротивления  $R_K$  за счет подключения параллельно  $R_{SH}$  сопротивлений электрической дуги. Ток  $i_K = f(t)$  не может измениться скачком в силу присутствия индуктивности в цепи КЗ. Он распределяется между сопротивлениями  $R_{SH}$  и  $R_{d,j}$  обратно пропорционально значениям этих сопротивлений.

Анализируя фрагменты зависимостей  $i_F = f(t)$  и  $i_{SH} = f(t)$  в переходном режиме (на рис. 3 показаны в увеличенном виде), можно увидеть, что после скачкообразного изменения тока  $i_F$  и  $i_{SH}$  на величину  $\Delta i$  их изменение происходит в соответствии с (5). Качественная картина переходного процесса КЗ соответствует законам электротехники.

Изменение напряжения на зажимах  $R_{SH}$  как в первом, так и во втором полупериоде представлено на зависимости  $U_{SH} = f(t)$ .

Часть исходных данных для математической модели обладают некоторой степенью неопределенности. К таким исходным данным относятся: время  $\Delta t_2, \Delta t_6$  существования паровой пробки – этапы 2 и 6, время  $\Delta t_4$  восстановления ЖСП после перехода через нулевое значение – этап 4, сопротивление электрической дуги. Их значения при расчетах выбраны произвольно по соображениям, связанным с наглядным представлением процесса на графических зависимостях, а также по причине отсутствия информации. Значения этих величин могут быть определены на основании экспериментальных исследований, после чего использоваться для уточненного исследования процесса КЗ.

Опытная осциллограмма тока КЗ в сети с токоограничивающим устройством на основе ЖСП [1] представлена на рис. 4. Осциллограмма отражает один из результатов коммутационных испытаний макетной конструкции токоограничивающего устройства на основе ЖСП в лаборатории коммутационных испытаний ОАО «Ульяновский завод «Контактор». Анализ результатов испытаний позволил выяснить значения  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_3$  и оценить значение сопротивления электрической дуги для рассматриваемого конкретного случая. Оценка величины сопротивления дуги проводилась на основании соотношения токов в ветви с ЖСП и в ветви с шунтирующим сопротивлением в период дуговой стадии процесса  $\Delta t_3$ . Это соотношение оказалось равным  $0,1-0,15$ . Стало быть, сопротивление дуги изменяется от  $10 \cdot R_{SH}$  до  $15 \cdot R_{SH}$ .

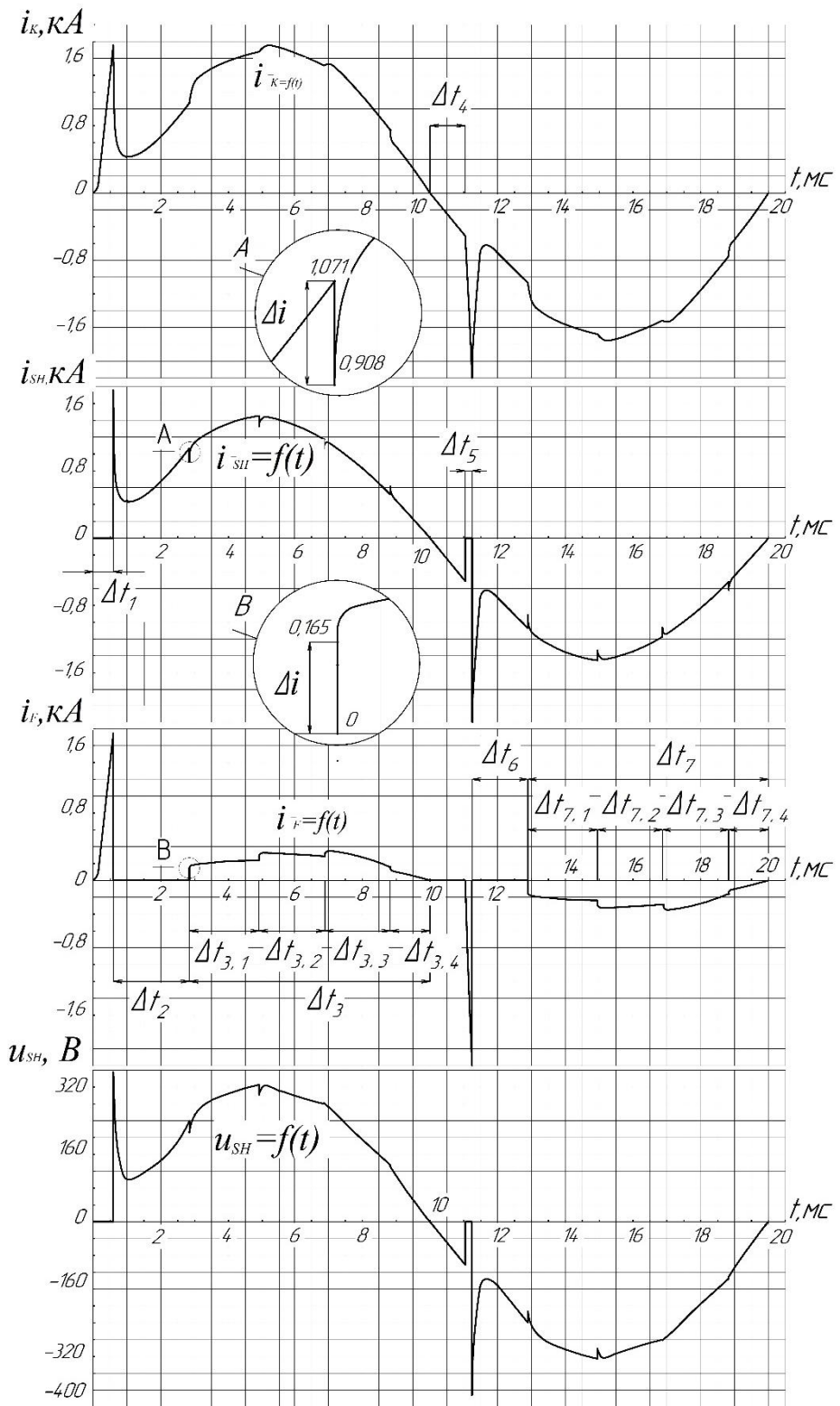


Рис. 3. Расчетные зависимости в ветвях схемы замещения

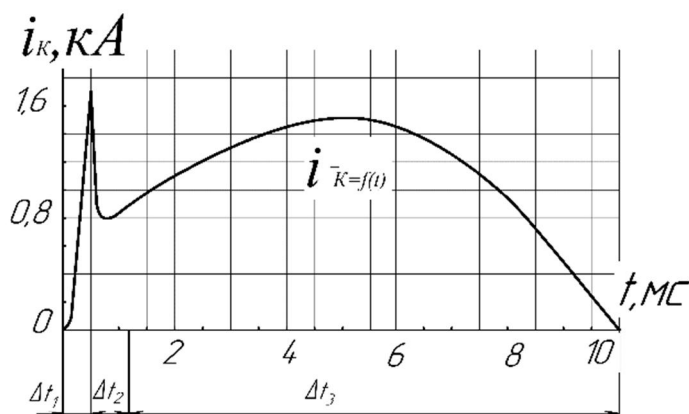


Рис. 4. Опытная осциллограмма тока короткого замыкания в сети с токоограничивающим устройством на основе ЖСП, шунтированного сопротивлением 0,2 Ом. Ударное значение тока в контуре 52,6 кА при напряжении 240 В (действующее значение);  $\cos \varphi = 0,19$ ;  $R_{ш} = 0,2 \text{ Ом}$

Параметры схемы испытательного контура, в котором проводился эксперимент, номинальные параметры ЖСП, а также значения  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_3$  и значения сопротивлений электрической дуги, полученные в результате коммутационных испытаний, могут представлять собой исходные данные, необходимые и достаточные для расчета зависимости  $i_k = f(t)$  по математической модели. Расчет зависимости производился с целью ее сравнения с опытной осциллограммой. Сравнение результатов расчета с опытной осциллограммой показало практически полное совпадение расчетной зависимости тока  $i_k = f(t)$  и зависимости тока от времени, представленной на опытной осциллограмме. Это подтверждает адекватность предложенной математической модели физическим процессам в цепи короткого замыкания с токоограничивающим устройством на основе ЖСП, шунтированного резистором. В общем случае адекватность подтверждается результатами анализа расчетных зависимостей, которые не противоречат физике процесса протекания токов в цепях переменного тока в переходных режимах.

Использование предложенной математической модели позволяет более качественно по сравнению с использованием известной математической модели исследовать токоограничивающие свойства устройства на основе ЖСП, шунтированного резистором, уточнить методику выбора его параметров.

## Выводы

1. Высокое быстродействие и токоограничивающие свойства ЖСП вызывают интерес к разработке и использованию ЖСП для ограничения токов короткого замыкания в системах электроснабжения. Уровень исследований как в нашей стране, так и за рубежом не позволяет перейти к созданию промышленных образцов ЖСП.

2. Наиболее полное научное обоснование в технической литературе получил вариант использования ЖСП в комплексе с шунтирующим сопротивлением и дополнительным коммутационным аппаратом. Научный задел в этом отношении более всего приближен к практическому выходу. Однако математическая модель, посредством которой получены имеющиеся результаты, несовершенна.

Она позволяет получить достоверные и достаточно точные результаты только в ограниченной области применения.

3. Для исследования процесса короткого замыкания в сети переменного тока с ЖСП, шунтированного резистором, предложена новая математическая модель, которая в отличие от известной позволяет более качественно исследовать токоограничивающие свойства устройства на основе ЖСП.

4. Анализ расчетных зависимостей на предмет соответствия основным положениям теории электрических цепей, а также их сравнение с осциллограммой, полученной в результате эксперимента, подтверждает адекватность предложенной математической модели физическим процессам в цепи короткого замыкания с токоограничивающим устройством на основе ЖСП.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов А.В. Жидкометаллические предохранители и инвестиционная привлекательность их разработки. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 207 с.
2. Патент 2242818 (RU), МКИ<sup>3</sup> 7Н01Н 87/00. Жидкометаллический самовосстанавливающийся ограничитель тока / А.В. Кузнецов (RU), И.В. Сычева (RU). – № 2003122171/09; Заявл. 15.07.03; Опубл. 20.12.04. Бюл. 35. – 4 с.
3. Niayesh K., Tepper J., König F. A Novel current limitation principle based on application of liquid metals // IEEE transaction on components and packaging technologies. 2006, vol. 29, № 2. P. 303–309.
4. Yiyng L., Yi W., Chen H., Hailong H. Investigation on the behavior of GaInSn liquid metal Current Limiter // IEEE transaction on components. 2014, № 2. – P. 209–215.
5. Zienicke E., Ben-Wen Li, Thess A., Kräzschmar A., Terhoeven P. Theoretical and Numerical Stability Analysis of the Liquid Metal Pinch Using the Shallow Water Approximation // Journal of Thermal Science. 2008, № 3. vol. 17. P. 261–266.
6. He H. et al. Study of Liquid Metal Fault Current Limiter for Medium-Voltage DC Power Systems, in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 8, no. 8, pp. 1391–1400, Aug. 2018.
7. Казанцев А.А., Косорлуков И.А. Разработка жидкометаллического ограничителя тока // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – № 12. – С. 25–27.
8. Itoh T., Miyamoto T., Wada Y., Mori T., and Sasao H. Design considerations on the P. P. F. For a control center, IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PA-92, no. 4, pp. 1292–1297, Jul. 1973.
9. Намитокоев К.К., Ильина Н.А., Шкловский И.Г. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 279 с.
10. Кужеков С.Л., Васильев Б.Н., Куров Н.Н. Оценка быстродействия жидкометаллического самовосстанавливающегося предохранителя // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 2. – С. 134–136.
11. Voronin A.A., Kireev K.V., Kulakov P.A., and Prikhodchenko V.I. Experience in the Application of Liquid-Metal Working Medium in High-Current Commutators and Contact Joints // Russian Electrical Engineering. 2008, vol. 79, no. 8. pp. 415–419.
12. Дегтярев А.А., Кужеков С.Л., Куров Н.Н., Пекарский А.А. Анализ разработок сверхбыстродействующих коммутационных аппаратов, обладающих токоограничивающим действием // Известия вузов. Электромеханика. – 2007. – Специальный выпуск. – С. 87–88.
13. Приходченко В.И., Серлуховитин М.Е., Скрипачев М.О., Ситников А.В. Жидкометаллический токоограничитель // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 60–61.
14. Кржижановский Р.Е., Штерн З.Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов (карбиды): Справочник. – Л.: Энергия, 1976. – 120 с.
15. De Palma J. and Gelet J. Observation of arcing inside a fuse under capacitor-discharge using 1 million frames per second X-ray imaging, 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), Warsaw, 2017, pp. 1–10.

Статья поступила в редакцию 12 февраля 2019 года

# MATHEMATICAL MODEL OF THE SHORT CIRCUITING PROCESS IN THE ELECTRICAL POWER NETWORK WITH THE CURRENT-LIMITING DEVICE BASED ON LIQUID METAL SELF-HEALING FUSE

*A.V. Kuznetsov, Y.P. Yurenkov*

Ulyanovsk State Technical University  
32, Severniy Venets str., Ulyanovsk, 432027, Russia

**Abstract.** *The paper claims that fast response and current-limiting properties of the liquid metal self-healing fuse are of interest regarding their using in power supply systems. However, the level of researches, both in our country and abroad, does not allow us to proceed with the development of production prototypes of liquid metal self-healing fuse. Further research is necessary.*

*To investigate the short-circuiting process in the alternating current mains, a mathematical model is proposed, which, compared to the known one, allows to investigate the current-limiting properties of liquid metal self-healing fuse more carefully for removing short-circuiting current, alike a current-limiting reactor. The model includes resistance of the electric arc during the switching process. The period of arcing can be divided into infinitesimal sections, the arc resistance at each one is assumed to be linear.*

*The results of the calculation are presented in the form of oscillograph records. The analysis of calculated oscillograph records allows us to state that the nature of current changes in the electric circuit with the liquid metal self-healing fuse is in full accordance with the main provisions of electric circuit theory, and the mathematical model adequately shows a clear picture of the short-circuiting process.*

*The comparison of calculation results with the oscillogram received from the experiment shows their complete identity, which confirms the adequacy of the proposed mathematical model to physical processes in the short circuit with the liquid metal self-healing fuse. It is recommended to use the model to determine the requirements for protection device parameters based on the liquid metal self-healing fuse during their development, design and operation.*

**Keywords:** *electricity supply system, mathematical model, protection gear, process a short circuit, liquid metal self-healing fuse, liquid metal current limiter.*

## REFERENCES

1. *Kuznetsov A.V. Liquid metal fuse and investment attractiveness of their development. Moscow: Energoatomizdat, 2006. 207 p. (In Russian).*
2. Patent 2242818 (RU), IPC 7H01H 87/00. Liquid metal self-healing current limiter / A.V. Kuznetsov (RU), I.V. Sycheva (RU) – № 2003122171/09; Application date 15.07.03; Publication Date 20.12.04, Bulletin 35. – 4 p. (In Russian).
3. *Niayesh K., Tepper J., König F. A Novel current limitation principle based on application of liquid metals // IEEE transaction on components and packaging technologies. 2006, vol. 29, № 2. P. 303–309.*
4. *Yiyang L., Yi W., Chen H., Hailong H. Investigation on the behavior of GaInSn liquid metal Current Limiter // IEEE transaction on components. 2014, № 2. P. 209–215.*
5. *Zienicke E., Ben-Wen Li, Thess A., Kräzschmar A., Terhoeven P. Theoretical and Numerical Stability Analysis of the Liquid Metal Pinch Using the Shallow Water Approximation // Journal of Thermal Science. 2008, № 3. vol. 17. P. 261–266.*
6. *He H. et al. Study of Liquid Metal Fault Current Limiter for Medium-Voltage DC Power Systems, in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 8, no. 8, pp. 1391–1400, Aug. 2018.*

---

*Anatoly V. Kuznetsov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Yriy P. Yurenkov, Assistant.*

7. *Kazantsev A.A., Kosorlukov I.A.* Development liquid metal current limiter // *Electrical equipment: maintenance and repair*. 2013, no. 12, pp. 25–27. (In Russian).
8. *Itoh T., Miyamoto T., Wada Y., Mori T., and Sasao H.* Design considerations on the P. P. F. For a control center, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PA-92, no. 4, pp. 1292–1297, Jul. 1973.
9. *Namitokov K.K., Ilina N.A., Shklovsky I.G.* Devices to protect semiconductor devices. – Moscow: Energoatomizdat, 1988. 279 p. (In Russian).
10. *Kuzhekov S.L., Vasiliev B.N., Kurov N.N.* Performance evaluation of a self-resetting liquid metal fuse // *Proceedings of higher educational institutions. Electromechanics*. 2012, № 2, pp. 134–136 (In Russian).
11. *Voronin A.A., Kireev K.V., Kulakov P.A., and Prihodchenko V.I.* Experience in the Application of Liquid-Metal Working Medium in High-Current Commutators and Contact Joints // *Russian Electrical Engineering*. 2008, vol. 79, no. 8. pp. 415–419.
12. *Dyagterov A.A., Kuzhekov S.L., Kurov N.N., Baker's A.A.* Analysis of the development of ultra-high-speed switching devices with current-limiting effect // *Proceedings of higher educational institutions. Electromechanics*. 2007. – Special edition. – p. 87–88 (In Russian).
13. *Prihodchenko V.I., Serpukhovitin M.E., Skripachev M.O., Sitnikov A.V.* Liquid metal current limiter // *News of universities. Electromechanics*. 2011, № 3, pp. 60–61 (In Russian).
14. *Krzhizhanovskij R.E., Shtern Z.Y.* Thermophysical properties non-metallic materials (carbides). Handbook. L.: Energiya, 1976. 120 p. (In Russian).
15. *De Palma J. and Gelet J.* Observation of arcing inside a fuse under capacitor-discharge using 1 million frames per second X-ray imaging, 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), Warsaw, 2017, pp. 1–10.