

УДК 621.316.91

**СИСТЕМА ЗАЩИТЫ
ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА
ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ С ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНЫМ
ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ ИНФОРМАЦИИ**

Д.Ю. Хохлов¹, А.И. Фесенко²

*Кафедры: «Электрооборудование и автоматизация» (1),
«Материалы и технология» (2), ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;
ket@nnn.tstu.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.Ф. Калининым

Ключевые слова и фразы: автономная система электроснабжения; быстродействующая система защиты; звено постоянного тока; короткое замыкание; тепловой поток рассеяния; чувствительный орган защиты.

Аннотация: Рассмотрен принцип защиты сильноточных звеньев постоянного тока от коротких замыканий при помощи коммутационных аппаратов, управляемых схемами, вычисляющими значение силы тока в проводнике на основании известных значений абсолютных температур проводника и окружающего воздуха, а также скорости изменения температуры проводника. Предлагается вариант чувствительного органа системы защиты.

В процессе эксплуатации автономных систем электроснабжения (АСЭСН) удаленных потребителей, в составе которых применяются звенья постоянного тока, имеют место аварийные режимы работы, среди которых широко распространены являющиеся короткие замыкания (КЗ). Характерной особенностью электроустановок постоянного тока является невозможность использования трансформаторов тока и напряжения для организации быстродействующих защит. Поэтому на практике в качестве средств защиты применяются, например, диодная защита, отличающаяся сложностью, громоздкостью и неэкономичностью, либо плавкие предохранители и автоматические выключатели, применяемые лишь для ограниченного диапазона токов и напряжений [1, с. 90–108, 143–149]. В данной работе ставится задача разработки системы защиты от КЗ в электроустановках со звеньями постоянного тока (в том числе, АСЭСН), лишенной недостатков перечисленных выше вариантов.

При рассмотрении проводника с определенными геометрическими размерами можно показать, что для определения зависимости силы тока в нем от приложенного к его концам напряжения с достаточной степенью точности применим закон Ома. Для этого используются уравнения (1), (2), получаемые в общей теории переноса [2, с. 181, 205]:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} - \sigma S \vec{\nabla} T; \quad (1)$$

$$\vec{q} = -\Pi \sigma \vec{E} - \lambda \vec{\nabla} T, \quad (2)$$

где \vec{j} – плотность тока в проводнике; \vec{q} – тепловой поток; Π – коэффициент Пельтье; λ – коэффициент теплопроводности материала проводника; σ – электрическая проводимость материала проводника; S – абсолютное значение термо-ЭДС; T – температура на оси проводника по шкале Кельвина.

При переходе к рассмотрению проекций векторов на направление вдоль оси проводника с током, из (1) следует соотношение

$$\frac{j}{\sigma} = E - S \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (3)$$

После интегрирования по всей длине проводника L выражение (3) примет вид

$$\int_L \frac{j}{\sigma} = \int_L E - S \int_L \frac{\partial T}{\partial x} = U - S \int_L \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (4)$$

Допуская, что температура проводника по всей длине одинакова, то есть $\int_L \frac{\partial T}{\partial x} = 0$, равенство (4) представляется в виде $j = \sigma E$. Таким образом, возможно использование закона Ома и, следовательно, закона Джоуля–Ленца для определения количества теплоты, выделившейся при протекании по проводнику электрического тока. Исходя из этого, энергетический баланс при КЗ проводника с сопротивлением $R(T)$ и массой M выражается следующим уравнением

$$\frac{j_K^2(t)}{\sigma(T)} = c_V(T) \gamma(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{F(T)}{V(T)} q(T), \quad (5)$$

где $j_K(t)$ – величина тока КЗ; $V(T)$ – объем проводника; $F(T)$ – площадь поверхности проводника; $\gamma(T)$ – плотность материала проводника; $q(T)$ – тепловой поток рассеяния.

Рассмотрим вставки круглого сечения, лишенные теплоизоляции. Для них

$$\frac{F(T)}{V(T)} = \frac{4\pi d_{\text{вст}} l}{\pi (d_{\text{вст}})^2 l} = \frac{4}{d_{\text{вст}}}, \quad (6)$$

где $d_{\text{вст}}$ – диаметр вставки.

Отсюда выражение (5) примет вид

$$\frac{j_K^2(t)}{\sigma(T)} = c_V(T) \gamma(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{4}{d_{\text{вст}}} q(T). \quad (7)$$

В общем случае тепловой поток рассеяния $q(T)$ состоит из трех составляющих:

1. *Конвективный теплообмен с окружающей средой (воздух)*. Данная компонента определяется эмпирическим выражением, основанным на модели бесконечно длинного цилиндра

$$q_{\text{конв}} = \alpha(T)(T - T_0), \quad (8)$$

где T – температура вставки на ее оси; T_0 – температура окружающей среды, $\alpha(T)$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, определяемый на основании

формулы И.М. Михеевой, применяемой для случая свободного движения воздуха возле горизонтальных труб круглого сечения [3, с. 226]

$$\text{Nu}_m = 0,50(\text{Gr}_m \text{Pr}_m)^{0,25} (\text{Pr}_m / \text{Pr}_w)^{0,25}, \quad (9)$$

где Nu_m ; Gr_m ; Pr_m – числа Нуссельта, Грасгофа и Прандтля при температуре $T_m = 0,50(T + T_0)$; Pr_w – число Прандтля при температуре поверхности теплообмена, то есть поверхности вставки. Приняв во внимание тот факт, что у газов число Прандтля с изменением температуры практически не меняется, формулу (9) можно записать в следующем виде

$$\text{Nu}_m = 0,54(\text{Gr}_m \text{Pr}_m)^{0,25}. \quad (10)$$

После подстановки в (10) выражений для указанных чисел при условии однородности материала вставки

$$\alpha(T) = \alpha_0 \lambda^A(T_m) \left(\frac{T - T_0}{(T_m + T_0) \nu^A(T_m) a^A(T_m)} \right)^{0,25}, \quad (11)$$

где $\alpha_0 = 0,54 \frac{\lambda^A(T_0)}{d_{\text{вст}}} \left(\frac{d_{\text{вст}}^3 g}{\nu^A(T_0) a^A(T_0)} \right)^{0,25}$; $\lambda^A(T)$, $\lambda^A(T_0)$, $\nu^A(T)$, $\nu^A(T_0)$, $a^A(T)$,

$a^A(T_0)$ – коэффициенты теплопроводности, кинематические вязкости и коэффициенты температуропроводности для воздуха при температурах T и T_0 соответственно. Отсюда окончательное значение составляющей

$$q_{\text{конв}} = 0,54 \frac{\lambda^A(T_0) \lambda^A(T_m)}{d_{\text{вст}}} \left(\frac{d_{\text{вст}}^3 g}{\nu^A(T_0) a^A(T_0)} \right)^{0,25} \times \left(\frac{T - T_0}{(T_m + T_0) \nu^A(T_m) a^A(T_m)} \right)^{0,25} (T - T_0). \quad (12)$$

2. *Излучение.* Ввиду того, что воздух является диатермической средой, тепловой поток определяется по закону Стефана–Больцмана

$$q_{\text{изл}} = \sigma_{\text{сб}} \varepsilon(T) T^4, \quad (13)$$

где $\sigma_{\text{сб}}$ – постоянная Стефана–Больцмана; $\varepsilon(T)$ – степень черноты материала вставки.

В соответствии с работой [4, с. 139] для температур до 700 К можно принять, что $\varepsilon(T) = 0,347 T \sqrt{\rho_{273}}$, где ρ_{273} – значение удельного сопротивления материала вставки при $T = 273$ К. Ограничение диапазона температур вставки значением 700 К обусловлено тем фактом, что предельно допустимая температура шин и составных частей ошиновки не должна превышать 573 К согласно [5, п. 1.4.16]. Тогда окончательно

$$q_{\text{изл}} = 0,347 \sigma_{\text{сб}} \sqrt{\rho_{273}} T^5. \quad (14)$$

3. *Поток теплопроводности и «электронная конвекция».* В данном случае учитывается связь тепловых потоков с перенесенным зарядом, так как теплота и заряд в металлах переносятся электронным газом [6]. Эта связь описывается

уравнениями (1) и (2). Решение указанной системы уравнений без учета протекания химических реакций окисления дает следующий результат

$$\bar{q}_{\text{ТЭК}} = -ST(\bar{j} + \sigma S \bar{\nabla} T) - \lambda \bar{\nabla} T = -ST\bar{j} - (\lambda + \sigma S^2 T) \bar{\nabla} T. \quad (15)$$

Однако, с учетом малости члена $\sigma S^2 T$, характеризующего перенос теплоты током, возникающим под действием градиента температур $\bar{\nabla} T$ (а не под действием внешнего поля), выражение (15) примет окончательный вид

$$\bar{q}_{\text{ТЭК}} = -ST\bar{j} - \lambda \bar{\nabla} T. \quad (16)$$

С учетом значения величины каждой из слагающих потока рассеяния можно записать уравнение теплопроводности (7) в виде

$$\begin{aligned} j_{\text{К}}^2 + c_{\text{V}}(T)\sigma(T)\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{4\sigma(T)}{d_{\text{вст}}}\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x} + j_{\text{К}}S(T)T\right) + \\ + \frac{2,16\sigma(T)\lambda^A(T_0)\lambda^A(T_m)}{d_{\text{вст}}}\left(\frac{d_{\text{вст}}^3 g}{v^A(T_0)a^A(T_0)}\right)^{0,25} \times \\ \times \left(\frac{T - T_0}{(T_m + T_0)v^A(T_m)a^A(T_m)}\right)^{0,25} (T - T_0) + \frac{1,388 \cdot \sigma(T)}{d_{\text{вст}}}\sigma_{\text{сб}}\sqrt{\rho_{273}}T^5. \end{aligned} \quad (17)$$

Граничные условия определяются из условия равенства температуры вставки на ее концах и температуры окружающей среды:

$$T|_{x=0} = T|_{x=l} = T, \quad T(x,0) = T_0.$$

Распределения величин температуры и градиента температуры по длине вставки, необходимые для нахождения составляющей потока теплопроводности и «электронной конвекции» с использованием выражения (16), могут быть получены решением первой краевой задачи конечно-разностным методом либо экспериментально при помощи тепловизионного метода.

Зависимости постоянных для материала вставки, входящих в выражение (17), от температуры вычисляются путем компьютерного моделирования методами нелинейной и полиномиальной регрессий по данным, приведенным в [7, 8].

В данной работе в качестве материала вставки принимается электротехническая медь марки М1, для которой значения указанных выше постоянных в диапазоне 200...700 К составляют:

– удельная теплоемкость (изобарная), Дж/(кг·К),

$$c_{\text{V}}(T) = 0,54779\theta^4 - 1,18167\theta^3 - 10,90400\theta^2 + 65,14620\theta + 331,28900;$$

– теплопроводность, Вт/(м·К),

$$\lambda(T) = -0,59149\theta^3 + 4,32114\theta^2 - 32,93530\theta + 430,39900;$$

– степень черноты,

$$\varepsilon(T) = 0,00146376\theta^3 + 0,02225740;$$

– термоЭДС, В/К,

$$S(T) = 1,05530 \cdot 10^{-6}\theta^2 - 7,34909 \cdot 10^{-7};$$

– удельное сопротивление, Ом·м,

$$\rho(T) = 1,70689 \cdot 10^{-6}\theta^{1,16142};$$

– удельная проводимость, См/м,

$$\sigma(T) = 1/\rho(T);$$

– плотность, кг/м³,

$$\gamma(T) = -1,42173\theta^3 + 8,30504\theta^2 - 170,91400\theta + 9094,08000.$$

Зависимости физических свойств воздуха от температуры получены аппроксимацией методом наименьших квадратов по данным [9]:

– теплопроводность, Вт/(м·К),

$$\lambda^A(T) = \frac{0,22175\theta}{7,36081 + \theta};$$

– кинематическая вязкость, кг/(м·с),

$$\nu^A(T) = 1,58799 \cdot 10^{-5} \theta^{1,68639};$$

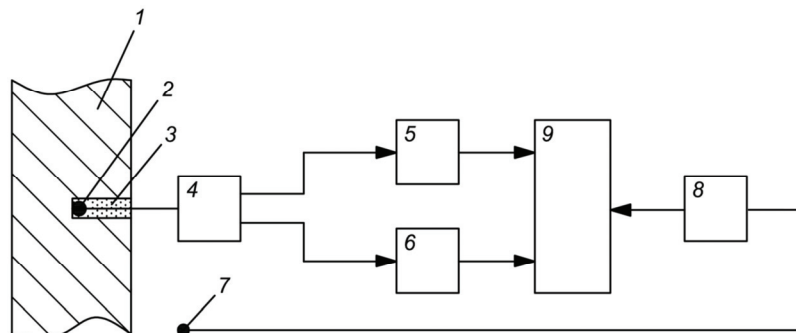
– температуропроводность, м²/с,

$$a^A(T) = 2,25628 \cdot 10^{-5} \theta^{1,68961},$$

где $\theta = \frac{T}{T_{оп}} = \frac{T}{300}$ – отношение температуры вставки к опорной температуре $T_{оп}$, принятой 300 К.

Решая уравнение (17) относительно j_k , можно вычислить значение тока короткого замыкания в любой момент времени на основании известных значений абсолютных температур вставки и окружающего воздуха, а также скорости изменения температуры вставки.

Рассмотрим структурную схему чувствительного органа предлагаемой системы защиты (рисунок). Устройство состоит из металлической вставки 1, монтируемой непосредственно в состав ошиновки защищаемой электроустановки, на оси которой размещается первая термопара 2, залитая теплопроводящим диэлектрическим компаундом 3. Сигнал с термопары 2, подключенной к блоку разделения сигнала 4, поступает на вход преобразователя температуры с частотным выходом 5 [10, с. 77], который преобразует значение абсолютной температуры вставки в частотно-импульсную форму, и на вход устройства для измерения и сигнализации скорости изменения температуры 6 с частотно-импульсным выходом [11]. Выходы блоков 5, 6 подключены к вычислительному устройству 9. В непосредственной близости от вставки 1 закреплена вторая термопара 7, сигнал с которой поступает на вход преобразователя температуры с частотным выходом 8, преобразующего значение абсолютной температуры окружающего воздуха в частотно-импульсную форму. Выход преобразователя 8 также подключен к вы-



Структурная схема чувствительного органа системы защиты

числительному устройству 9, где на основании получаемых от преобразователей 5, 6 и 8 данных происходит вычисление силы тока, протекающего во вставке, и, в случае превышения указанной величиной допустимых значений вырабатывается сигнал управления коммутационным аппаратом.

Таким образом, в работе синтезирована система защиты от КЗ в электроустановках со звеньями постоянного тока (в том числе, АСЭСН), способная не только распознать аварийный режим и выдать команду на отключение коммутационного аппарата, но и обладающая гальванической развязкой от главных цепей, что существенно повышает электробезопасность.

Список литературы

1. Кабышев, А.В. Расчет и проектирование систем электроснабжения : справ. материалы по электрооборудованию / А.В. Кабышев, С.Г. Обухов. – Томск : Том. политехн. ун-т, 2005. – 168 с.
2. Протасов, Ю.С. Физическая электроника газоразрядных устройств. Эмиссионная электроника / Ю.С. Протасов, С.Н. Чувашев. – М. : Высшая школа, 1992. – 464 с.
3. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.-Л. : Энергия, 1965. – 424 с.
4. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл ; пер. с англ. под ред. Б. А. Хрусталева. – М. : Мир, 1975. – 935 с.
5. Правила устройства электроустановок / Минтопэнерго России. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Госэнергонадзор РФ, 2003. – 608 с.
6. Павлов, П.В. Физика твердого тела / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. – М. : Высшая школа, 1985. – 384 с.
7. Физические величины : справочник / А.П. Бабичев [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
8. Зиновьев, В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В.Е. Зиновьев. – М. : Metallurgia, 1989. – 384 с.
9. Теория тепломассообмена / под ред. А.И. Леонтьева. – М. : Высшая школа, 1985. – 385 с.
10. Власов, В.В. Автоматические устройства для теплофизических измерений твердых материалов / В.В. Власов, М.В. Кулаков, А.И. Фесенко. – Тамбов : [б. и.], 1972. – 160 с.
11. А. с. 528459 СССР, МКИ² G 01 K 7/02. Устройство для измерения и сигнализации скорости изменения температуры / Фесенко А.И., Глушко А.А. ; заявитель и патентообладатель Тамб. ин-т хим. машиностроения. – № 2090473/10 ; заявл. 03.01.1975 ; опубл. 15.09.1976, Бюл. № 34. – 2 с.

Protection System of Direct Current Electricity Generating Plant against Short Circuits with Pulse-Frequency Data Presentation

D.Yu. Khokhlov¹, A.I. Fesenko²

*Departments: “Electrical Equipment and Automation” (1),
“Materials and Technology”, TSTU;
ket@nnn.tstu.ru*

Key words and phrases: DC link; heat leakage flux; high-speed protection system; protection sensitive organ; short circuit; stand-alone power system.

Abstract: We consider the principle of protection of high-current DC links against short-circuits with switching devices controlled by circuits computing the value of current in a conductor on the basis of the known values of the absolute temperature of the conductor and the ambient air, as well as the change rate of the conductor temperature. We offer a version of the protection sensitive organ.

System des Schutzes der Elektroanlagen des Gleichstroms von den Kurzschlüssen mit der frequenz-impulsartigen Vorlegung der Information

Zusammenfassung: Es wird das Prinzip des Schutzes der Starkstromglieder des Gleichstromes von den Kurzschlüssen mit Hilfe der Schaltapparate, die von den Schemen gesteuert werden, die den Wert der Kraft des Stromes im Leiter auf Grund der bekannten Werte der absoluten Temperaturen des Leiters und der Luft, sowie der Geschwindigkeit der Veränderung der Temperatur des Leiters berechnet werden. Es wird die Variante des empfindlichen Organes des Systems des Schutzes vorgeschlagen.

Système de la protection des installations électriques du courant continu contre les courts-circuits avec une présentation impulsionnelle et de fréquence de l'information

Résumé: Est examiné le principe de la protection des maillons à haute intensité du courant continu contre les courts-circuits à l'aide des appareils de commutation commandés par les circuits calculant la grandeur de l'intensité du courant dans le conducteur à la base des valeurs connues des températures absolues du conducteur et de l'air entourant ainsi que de la vitesse du changement de la température du conducteur. Est proposé un variant de l'organe sensible du système de la protection.

Авторы: *Хохлов Дмитрий Юрьевич* – аспирант кафедры «Электрооборудование и автоматизация»; *Фесенко Александр Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Шувалов Анатолий Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Альтернативные источники энергии» ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии, г. Тамбов.
