

ках и других устройствах для направленного движения материала.

Библиографический список

1. Федоренко, И. Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов / И. Я. Федоренко. – М.: Форум, 2015. – 176 с. – Текст: непосредственный.
2. Садов, В.В. Обоснование параметров разгонного диска на дробилках с вертикальными валами / В. В. Садов, В. А. Садовая. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 1 (51). – С. 43-46.
3. Халанский, В. М. Сельскохозяйственные машины / В. М. Халанский, И. В. Горбачев. – Москва: КолосС, 2004. – 624 с. – Текст: непосредственный.
4. Стесин, С. П. Лопастные машины и гидродинамические передачи / С. П. Стесин, Е. А. Яковенко. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с. – Текст: непосредственный.
5. Садов, В. В. Теоретические предпосылки обоснования разрушения зернового материала разгонным диском в молотковой дробилке / В. В. Садов, С. А. Сорокин. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 2 (172). – С. 156-161.
6. Перепелица, С. В. Исследование процессов, влияющих на скорость подачи измельчаемых

сыпучих тел / С. В. Перепелица. – Текст: непосредственный // Ползуновский альманах. – 2004. – № 1. – С. 159-166.

7. Гийо, Р. Проблема измельчения материалов и ее развитие / Р. Гийо. – Москва, 1964. – Текст: непосредственный.

References

1. Fedorenko, I.Ya. Tekhnologicheskie protsessy i oborudovanie dlya prigotovleniya kormov. – M.: Forum, 2015. – 176 s.
2. Sadov, V.V. Obosnovanie parametrov razgonnogo diska na drobilkakh s vertikalnymi valami / Sadov V.V., Sadovaya V.A. // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2009. – No. 1 (51). – S. 43-46.
3. Khalanskiy, V.M. Selskokhozyaystvennye mashiny / Khalanskiy V.M., Gorbachev I.V. – M.: KolosS, 2004. – 624 s.
4. Stesin, S.P. Lopastnye mashiny i gidrodinamicheskie peredachi / S.P. Stesin, E.A. Yakovenko. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 240 s.
5. Sadov, V.V. Teoreticheskie predposylki obosnovaniya razrusheniya zernovogo materiala razgonnym diskom v molotkovoy drobilke / V.V. Sadov, S.A. Sorokin // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2019. – No. 2 (172). – S. 156-161.
6. Perepelitsa, S.V. Issledovanie protsessov, vliyayushchikh na skorost podachi izmelchaemykh sypuchikh tel // Polzunovskiy almanakh. – 2004. – No. 1. – S. 159-166.
7. Giyo, R. Problema izmelcheniya materialov i ee razvitie. – M., 1964.



УДК 621.31

Б.С. Компанеец, С.Ф. Нефедов
B.S. Kompaneyets, S.F. Nefedov

АНАЛИЗ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ НА ОСНОВЕ ВЫДЕЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

ANALYSIS OF ELECTRICAL PROTECTION OPERATION BASED ON RELEASED SHORT CIRCUIT ENERGY

Ключевые слова: безопасность электроустановок, короткое замыкание, перегорев проводника, пожар, тепловой баланс.

Keywords: electrical installation safety, short circuit, wire thermal break, fire, thermal balance.

Вопрос безопасности при эксплуатации электроустановок особенно остро стоит для электроустановок низкого напряжения, что подтверждается статистикой эксплуатации. Одной из причин низкой эффективности работы аппаратов защиты является случайный характер переходных процессов в точке короткого замыкания. Параметры сети также будут оказывать влияние на особенности переходного процесса. При приближении точки КЗ к источнику питания возрастает не только величина тока КЗ, но и кратность его ударной составляющей. Существующие способы определения длительности срабатывания аппарата защиты не позволяют учитывать данный фактор, так как все характеристики получены для постоянной величины тока. Таким образом, целесообразно будет производить оценку работы аппарата защиты на основании количества энергии, необходимой для срабатывания. Доказано, что срабатывание теплового и электромагнитного расцепителей связано с квадратом протекающего тока. Значит, погрешность при определении величины протекающего тока будет оказывать существенное влияние на результаты расчетов. Учет свободной составляющей тока КЗ при ее максимальном значении и различной протяженности линии будет давать изменение времени протекания процесса короткого замыкания от 1,17 до 1,9 раз. При этом существует вероятность, что свободная составляющая будет полностью отсутствовать. Для реализации данного подхода в первую очередь необходимо перейти от графического представления токо-временных характеристик срабатывания аппарата защиты и эффекта пережога провода к их описанию при помощи функций. Определены виды функций и их параметры для аппарата защиты. Разработана математическая модель пережога проводника в процессе дугового короткого замыкания. Главным достоинством данного подхода является то, что данная технология позволяет снять нерешаемость задачи, обусловленной снижением величины тока короткого замыкания, например, в результате нагревания самих проводников или места короткого замыкания или изменения характера самого замыкания с дугового на металлическое.

The issue of safety during the electrical installations operation is especially acute for low-voltage electrical installations. The maintenance statistics confirms that. The random nature of transient processes at the short circuit point is one of the reasons for the protection devices low efficiency. Network parameters will also affect the characteristics of the transition process. When the short circuit point approaches to the power source, it increases not only the short circuit current, but also the multiplicity of its impact current component. The existing methods for duration determining of the protection devices triggering time do not allow considering this factor since all the characteristics obtained for a constant current value. Thus, it will be advisable to evaluate the operation of the protection device based on of the amount of energy required for triggering. We know that the operation of thermal and electromagnetic release devices is associated with the square of the flowing current. Therefore, the error in determining the magnitude of the flowing current will have a significant impact on the calculation results. Accounting for the free component of the short circuit current at its maximum value and different line lengths will give a change in the duration of the short circuit process from 1.17 to 1.9 times. Besides, there is a possibility that the free component will be completely absent. To implement this approach, above all, it is necessary to move from a graphical representation of the current-temporal dependencies of the protection device operation and the wire thermal break effect to their description using functions. The kinds of functions and their parameters for the protection devices are determined. A mathematical model of the conductor thermal break in the process of an arc short circuit is developed. The main advantage of this approach is that this technology allows removing the insolvability of the problem due to the reduction of the short circuit current. For example, it may happen in consequence of heating the conductors themselves or the place of a short circuit or changing the nature of the circuit itself from arc to metal one.

Компанеец Борис Сергеевич, к.т.н., доцент, каф. ЭПБ, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. E-mail: kompbs@mail.ru.

Нефедов Сергей Федорович, к.т.н., доцент, каф. ЭПБ, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. E-mail: nfdv@inbox.ru.

Kompaneyets Boris Sergeyevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. E-mail: kompbs@mail.ru.

Nefedov Sergey Fedorovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. E-mail: nfdv@inbox.ru.

Введение

Одной из важнейших проблемных областей в энергетике является вопрос безопасности. Эксплуатация потребительских сетей 0,4 кВ накладывает большую ответственность по уровню защищенности от пожаров и поражений электрическим током. Статистика показывает, что существующих мер в этой области недостаточно [1, 2]. В основе решения таких задач лежит исследова-

ние аппаратов защиты (АЗ) и влияния процессов при коротких замыканиях (КЗ) на токопроводящие элементы сети [3-5]. Пожарную опасность создает в частности разрушение провода. Время срабатывания АЗ и время разрушения провода зависят от значений токов КЗ, которые вызывают эти процессы. Таким образом, показатели опасности описываются токо-временными зависимостями характеристик АЗ и пережога.

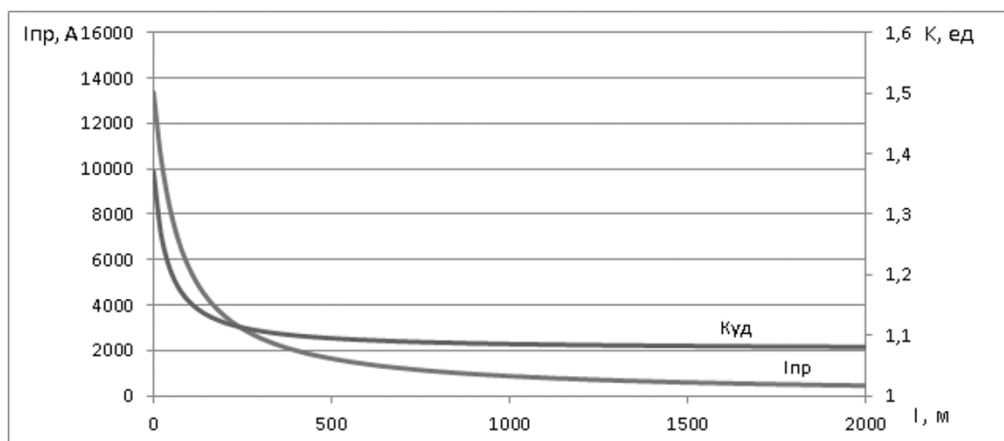


Рис. 1. Графики изменения величины принужденной составляющей тока КЗ и кратности ударного тока от удаленности точки КЗ

Причины снижения точности вычислений.

Случайный характер переходных процессов в точке КЗ значительно влияет на точность вычислений. КЗ является быстродействующим процессом. В случае работы электромагнитного расцепителя это время составляет 0,01-0,05 с, что сопоставимо с периодом синусоиды тока промышленной частоты [6-9]. Таким образом, переходный процесс, который возникает при появлении замыкания, будет оказывать большое влияние на работу АЗ. Величина ударного тока и особенности переходного процесса будут зависеть от начальной фазы напряжения. Параметры сети также будут оказывать влияние на особенности переходного процесса. Имеются ввиду применяемый трансформатор, марка провода линии и удаленность точки КЗ. При этом влияние оказывается не только на амплитуду тока КЗ, помимо этого изменяется соотношение активной и реактивной составляющих сопротивления [10-14].

При приближении точки КЗ к источнику питания возрастает не только величина тока КЗ, но и кратность его ударной составляющей. Свободная составляющая тока оказывает существенное влияние на процесс КЗ, особенно в зоне работы электромагнитных расцепителей автоматических выключателей.

Рассмотрим влияние удаленности точки КЗ на переходный процесс. Мы будем производить оценку влияния по величине принужденного тока КЗ и по кратности ударного тока к величине принужденной составляющей тока. Их графики пред-

ставлены на рисунке 1. Для моделирования возьмем трансформатор ТМ 250/10/0,4 и отходящую линию, выполненную проводом 4А95.

Существующие способы определения длительности срабатывания АЗ не позволяют учитывать данный фактор, так как все характеристики АЗ получены для постоянной величины тока КЗ. При оценке эффективности защиты на основании пережога проводника характеристики пережога также сняты для постоянной величины тока КЗ.

Кроме того, оценивать работу АЗ на основании ударного тока тоже некорректно, так как он действует меньшее время, чем может потребоваться АЗ для срабатывания [15].

Цель исследований – разработать методику анализа пожароопасных процессов при КЗ, позволяющую производить расчет времени срабатывания АЗ и пережога проводника, с учетом начальной фазы тока КЗ и параметров линии. В этом случае целесообразно будет производить оценку работы АЗ и пережога провода на основании количества энергии, необходимой для завершения процесса. Данную методику можно назвать энергетическим подходом к оценке пожарной опасности объектов.

Работа расцепителей автоматического выключателя. Под энергией срабатывания теплового расцепителя автоматического выключателя или энергией срабатывания предохранителя будет подразумеваться нагрев элемента до его срабатывания $I^2 \cdot R \cdot t$. Соответственно, для определения времени срабатывания элемента нам необ-

ходимо ориентироваться не на действующее значение тока, а на интеграл от мгновенного значения тока. Когда на элементе выделится достаточная энергия – он сработает.

Работу электромагнитного расцепителя можно рассмотреть как взаимодействие сил электрического тока, который будет совершать работу по втягиванию стального сердечника, и пружины, которая будет противодействовать данному процессу.

Сила втягивания стального сердечника равна:

$$F_{ЭМ} = - \frac{dW_m}{dx} = - \frac{1}{2} I^2 \frac{dL_{кат}}{dx}, \quad (1)$$

где $F_{эм}$ – сила втягивания стального сердечника;

dW_m – изменение энергии магнитного поля;

I – величина протекающего тока;

dL_{coil} – изменение индуктивности;

dx – изменение положения сердечника.

Работа силы:

$$A = (F_{ЭМ} - F_{пр}) \cdot l, \quad (2)$$

где A – совершаемая работа аппарата при работе электромагнитного расцепителя;

$F_{пр}$ – сила противодействия пружины;

l – перемещение сердечника в направлении действия силы.

Таким образом, срабатывание теплового и электромагнитного расцепителей связано с I^2 . Значит, погрешность при определении величины протекающего тока будет оказывать существенное влияние на результаты расчетов срабатывания АЗ. Учет свободной составляющей тока КЗ при ее максимальном значении и различной протяженности линии будет давать изменение времени протекания процесса КЗ от 1,17 до 1,9 раз. При этом существует вероятность, что свободная составляющая будет полностью отсутствовать.

Полиномиальная аппроксимация. Для реализации данного подхода в первую очередь необходимо перейти от графического представления токо-временных характеристик срабатывания АЗ и эффекта пережога провода к их описанию при помощи функций. На основании этих функций можно будет определить энергетические показатели их работы и в дальнейшем производить оценку достаточности величины выделяемой энергии.

Во время анализа времени срабатывания аппарата защиты и влияния процесса короткого замыкания на проводники с помощью графического представления для описания кривых использовалась кусочно-линейная аппроксимация. В этой связи было принято решение перейти к гладкому способу описания кривых и прибегнуть к полиномиальной аппроксимации при моделировании.

Набор функций, выбранный под указанную задачу, должен максимально близко описывать интересные нас токо-временные характеристики. Поэтому были проведены исследования на предмет выявления одной или нескольких из них для максимально корректного изображения характеристик АЗ и пережога. Сами характеристики могут иметь неоднородную структуру и требуют дополнительных пояснений, так как в этом случае разбиваются на зоны.

Характеристику срабатывания автоматического выключателя можно разбить на два участка: зону теплового расцепителя и зону электромагнитного расцепителя. Рассмотрим задачу получения аппроксимирующих кривых на примере токо-временной характеристики автоматического выключателя С60 типа В. Токи срабатывания его электромагнитного расцепителя находятся в пределах 3-5 $I_{ном}$. Затем проведем контроль качества аппроксимации.

Тепловой расцепитель реализован с помощью биметаллической пластины. Она изменяет свою форму в зависимости от изменений температуры, вызванных нагревом и неравномерностью теплового расширения материалов пластины. Это происходит вследствие протекания по ней тока. Поэтому характеристика теплового расцепителя описывается кривой.

Для наиболее точного описания участка характеристики в зоне теплового расцепителя была проведена его аппроксимация набором функций, наиболее приближенно повторяющих форму паспортной кривой. Кривая была получена заводом изготовителем для аппарата защиты экспериментально. К таким функциям были отнесены следующие:

$$\begin{aligned}
 f_1(x) &= k_1 \cdot \frac{1}{x} + k_0; \\
 f_2(x) &= k_1 \cdot x^{-k_2} + k_0; \\
 f_3(x) &= k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot x} + k_0; \\
 f_4(x) &= k_1 \cdot k_3^{-k_2 \cdot x} + k_0; \\
 f_5(x) &= -k_1 \cdot \operatorname{tg}(k_2 \cdot x) + k_0,
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где k с индексом обозначают параметры для задания формы каждой конкретной кривой. Декартовы координаты символизируют токо-временную зависимость.

Критерии, определяющие наилучшее описание функцией исходных данных, могут быть различными. В данном случае был выбран метод наименьших квадратов, так как он дает очень хорошие оценки по статистическим данным, и при этом обладает малым вычислительным весом. Для этого после выбора аппроксимирующей функции $f(x_i, k_0, k_1, k_2)$ строится сумма следующего вида (называемая суммой наименьших квадратов):

$$\Sigma Q = \sum_{i=1}^n [f(x_i, k_0, k_1, k_2, \dots) - y_i]^2. \tag{4}$$

Функция, у которой сумма ΣQ окажется наименьшей, будет наиболее близко описывать характеристику теплового расцепителя автоматического выключателя. Следовательно, именно этот вид функции принимается как исходный для дальнейшего моделирования. Для проведения расчетов графическим способом были взяты десять

опорных точек с шагом «1» по кратности тока срабатывания. Данные точки занесены в таблице 1.

Расчет коэффициентов $k_0 \dots k_n$ производился из условия минимального значения ΣQ для каждой функции. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Расчет суммы наименьших квадратов для выбранных функций представлен в таблице 3.

По результатам расчетов было принято решение о том, что наиболее точно данный участок описывается экспоненциальной зависимостью вида: $f(x) = 179287 \cdot e^{-4,5 \cdot x} + 2,04$. Для данной функции сумма наименьших квадратов минимальна.

Таблица 1

Участок работы теплового расцепителя автоматического выключателя

Опорные точки участка тепловой характеристики автоматического выключателя С60	
I/Inom	t, с
1	2000
2	24
3	6,5
4	3,4
5	2,1
6	1,6
7	1,1
8	0,87
9	0,68
10	0,6

Таблица 2

Параметры аппроксимирующих функций для участка работы теплового расцепителя

Результаты расчетов коэффициентов функций кривой теплового расцепителя					
№	Вид функции	Значение k_0	Значение k_1	Значение k_2	Значение k_3
1	$k_1 \cdot \frac{1}{x} + k_0$	-396,348	2049,982		
2	$k_1 \cdot x^{-k_2} + k_0$	4,538888	1995,461	53687091	
3	$k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot x} + k_0$	2,03769	179287	4,496862	
4	$k_1 \cdot k_3^{-k_2 \cdot x} + k_0$	1,154546	132213,6	0,697447	407,65919
5	$-k_1 \cdot \operatorname{tg}(k_2 \cdot x) + k_0$	-134,552	1,232523	1,570146	

Таблица 3

Расчет суммы наименьших квадратов для выбранных функций

Результат расчета суммы квадратов исследуемых функций					
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Σ	676547,9	454,156	26,04793	84,941387	480052,4

При дальнейших расчетах для получения аналитической зависимости времени срабатывания теплового расцепителя любого автоматического выключателя необходимо выбрать три точки характеристики и решить систему уравнений относительно этих точек. Это делается для получения необходимых коэффициентов.

Второй участок характеристики срабатывания автоматического выключателя – это зона работы электромагнитного расцепителя, описываемая линейной зависимостью $f(x)=k_1 \cdot x+k_0$. Следует отметить, что участок характеристики срабатывания автоматического выключателя, описывающего электромагнитный расцепитель, физически имеет нелинейный вид. Это связано с тем, что зона электромагнитного расцепителя изображает величину тока, не имеет бесконечной протяженности и не может пересекать соответствующую ось. В данном исследовании можно пренебречь этим обстоятельством, так как характеристика срабатывания электромагнитного расцепителя в графическом виде не описывает эти области, и в текущей работе они не представляют интереса. Для определения коэффициентов соответствующего аппарата защиты достаточно будет решить систему линейных уравнений.

Для построения математической модели характеристики пережога была выбрана характеристика алюминиевого провода сечением 2,5 мм².

Так как характеристика пережога получена экспериментально и явный вид описывающей ее функции неизвестен, необходимо воспользоваться методами интерполяции. Но значения функции времени имеют существенную погрешность, поэтому при вычислении значений функции для каждого из аргументов целесообразно также применять методы аппроксимации. Для простоты вычислений используем среднее арифметическое для данных времени пережога в каждом узле интерполяции. Результаты расчетов внесены в таблицу 4.

Характеристика пережога в целом хорошо описывается линейной зависимостью. В области малых токов график характеристики должен бесконечно приближаться к оси ординат. При этом

существует уровень тока, при котором пережог провода происходить не будет. Вся теплота, выделяемая вследствие действия тока в проводнике, рассеивается в окружающую среду. Таким образом, график характеристики пережога провода в действительности имеет нелинейный вид, и для проведения дальнейшей работы необходимо внести поправки в описывающую его функцию.

Таблица 4

**Зависимость времени пережога
алюминиевого провода 2,5 мм²
от протекающего тока**

Характеристика пережога алюминиевого провода сечением 2,5 мм ²	
<i>I</i> , А	<i>t</i> , с
125	0,01035
510	0,0078
730	0,006
1050	0,004475
1400	0,004

Для характеристики пережога произведем аппроксимацию тем же набором функций, что и для участка характеристики теплового расцепителя автоматического выключателя, так как вид этой функции должен быть похож на кривую теплового расцепителя.

Расчет коэффициентов $k_0 \dots k_n$ осуществлялся из условия минимального значения ΣQ для каждой функции. Были вычислены коэффициенты для каждой из рассматриваемых функций.

В итоге было принято решение, что наиболее точно данный участок описывается гиперболической зависимостью вида $f(x)=766,3 \cdot 1/x+4,53$, так как сумма наименьших квадратов для данной функции минимальна.

Энергия пережога провода. Процесс пережога проводника – это расплавление материала за счет энергии, выделяемой в месте КЗ. Рассматривались два вида замыкания: металлическое и дуговое. Вид замыкания будет влиять на величину электрического сопротивления в месте замыкания и на выделяемую энергию. Моделирование тепловых процессов при возникновении КЗ рассматривается в источниках [16]. Для металличе-

ского КЗ сопротивление будет мало, а для дугового – значительно больше.

Вначале рассмотрим процесс дугового замыкания, как наиболее опасный вид КЗ. Так как мы рассматриваем процесс расплавления материала в зоне замыкания, то запишем уравнение теплового баланса:

$$Qdt = Gcd\Theta + S\lambda\Theta dt, \quad (5)$$

где Q – мощность, выделяемая в месте КЗ;

G – масса нагреваемого материала;

c – удельная теплоемкость материала;

Θ – разница температуры с окружающей средой;

S – площадь поверхности охлаждения;

λ – коэффициент теплоотдачи, учитывающий все виды переноса тепла.

Рассмотрим протекающие процессы для внутренней электропроводки. Она практически всегда выполняется медными или алюминиевыми изолированными проводниками цилиндрической формы.

В этом случае длина дуги будет по сути определяться толщиной поврежденной изоляции. Тогда энергия, выделяемая в зоне КЗ будет определяться по формуле:

$$Qdt = i^2 R_d dt, \quad (6)$$

где i – мгновенное значение тока;

R_d – сопротивление электрической дуги.

Согласно ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках значение сопротивления дуги имеет следующую зависимость:

$$R_d = 16 \frac{\sqrt{l_d}}{I_{под}^{0,85}}, \quad (7)$$

где $I_{под}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ, кА;

l_d – длина дуги в сантиметрах.

Во время горения электрической дуги из-за ее высокой температуры и низкой теплопроводности воздуха основная часть энергии выделяется в виде излучения. При этом энергия излучается во всех направлениях. На нагрев проводника расходуется только часть той энергии, которая при излучении попадает на поверхность проводника. Часть мощности, идущей на нагрев тела, будет равна отношению телесного угла, образованного

поверхностью проводника и излучающей точкой к телесному углу сферы:

$$P \sim \frac{\Omega}{4\pi}; \quad (8)$$

$$\text{где } \Omega = \frac{S_{пов}}{r^2} = \frac{2\pi rh}{r^2} = \frac{2\pi h}{r}; \quad (9)$$

$$r_{осн} = \frac{S}{\pi} = \frac{I_{КЗ}/J_{пл}}{\pi}, \quad (10)$$

$S_{пов}$ – площадь поверхности проводника, на которую действует излучение дуги;

$r_{осн}$ – радиус основания, на которое проецируется излучение дуги;

$I_{КЗ}$ – величина тока КЗ;

$J_{пл}$ – плотность тока в дуге 500 А/мм².

Рассмотрим энергию, выделяемую в электрической дуге и идущую на нагрев проводника. Для этого разобьем дугу на бесконечно малые слои. В связи с малой толщиной дуги по сравнению с ее длиной сделаем допущение и рассмотрим данную площадку, имеющую единый телесный угол, тогда:

$$r = \sqrt{R^2 + l^2}; \quad (11)$$

$$h = r - l = \sqrt{R^2 + l^2} - l; \quad (12)$$

$$\Omega = 2\pi \cdot \left(1 - \frac{l}{\sqrt{R^2 + l^2}}\right). \quad (13)$$

Определим энергию нагрева, для этого рассмотрим энергию, выделяемую элементарным слоем:

$$dP = i^2 dR = i^2 \frac{\rho}{S} dl. \quad (14)$$

Часть энергии, нагревающая поверхность:

$$dP = i^2 \frac{\rho}{S} dl \cdot \frac{\Omega}{4\pi}. \quad (15)$$

Просуммируем данную энергию по всей длине дуги:

$$P = \sum dP = \sum i^2 \frac{\rho}{S} dl \cdot \frac{\Omega}{4\pi} = \int_0^{l_d} i^2 \frac{\rho}{S} \cdot \frac{\Omega}{4\pi} dl = \int_0^{l_d} i^2 \frac{\rho}{S} \cdot \frac{2\pi}{4\pi} \left(1 - \frac{l}{\sqrt{R^2 + l^2}}\right) dl. \quad (16)$$

Решая данное выражение, получим:

$$P = \frac{i^2 R_d}{2} \left(1 - \sqrt{\left(\frac{R}{l_d}\right)^2 + 1} + \frac{R}{l_d}\right). \quad (17)$$

Нагрев проводника в этом случае будет представляться в виде расширяющейся сферы. В том случае если сфера перекроет все сечение про-

водника, то пережог произойдет. Будем считать, что за счет быстротечности протекающего процесса и поверхностного натяжения расплавленного материала материал нагревается во всем объеме и во всех точках. Он достигает температуры плавления и изменения агрегатного состояния, и только после этого произойдет пережог проводника. На рисунке 2 показано графическое представление момента пережога проводника.

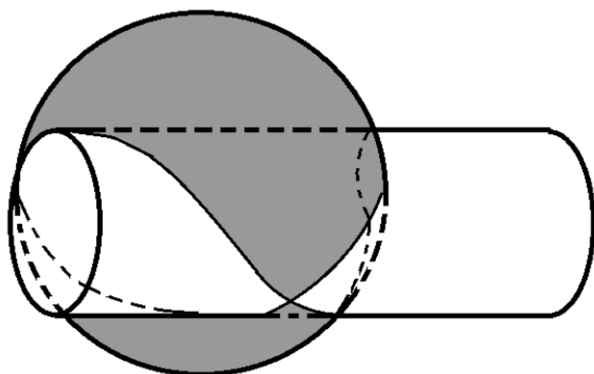


Рис. 2. Графическое представление момента пережога проводника

Объем тела и площадь поверхности фигуры пересечения проводника и границы пережога определены при помощи компьютерного моделирования:

$$V = 1,19777d^3; \quad (18)$$

$$S = 6,25d^2, \quad (19)$$

где d – диаметр провода.

Для пережога проводника необходимо нагреть данный объем до температуры плавления, а также передать энергию для изменения агрегатного состояния вещества. Энергия нагрева проводника вплоть до его расплавления в этом случае будет иметь вид:

$$\begin{aligned} Gcd\theta &= \rho_{пл} 1,1977d^3 c_{нр} d\theta + \rho_{пл} 1,1977d^3 c_{пл} = \\ &= \rho_{пл} 1,1977d^3 \cdot (c_{нр} d\theta + c_{пл}), \end{aligned} \quad (20)$$

где $\rho_{пл}$ – плотность материала;

$c_{нр}$ – теплоемкость материала;

$c_{пл}$ – теплоемкость плавления материала.

Так как при пережоге температура проводника превышает температуру окружающей среды, то неизбежно будут протекать процессы переноса тепла от места нагрева. Можно отметить, что теп-

ло будет отдаваться как во внешнюю среду (воздух или изоляция), так и передаваться по длине проводника.

Стоит сказать, что коэффициент теплоотдачи имеет сложную зависимость и в дальнейшем планируется уточнение значения λ по экспериментальным данным. В этом случае можно объединить все способы переноса тепла от нагретой поверхности в общий тепловой поток. Тогда отводимая энергия от места нагрева будет иметь вид:

$$S\lambda\theta dt = 6,25d^2 \lambda\theta dt. \quad (21)$$

Уравнение теплового баланса примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{i^2 R_d}{2} \left(1 - \sqrt{\left(\frac{R}{l_d}\right)^2 + 1} + \frac{R}{l_d} \right) dt = \\ = \rho_{пл} 1,1977d^3 \cdot (c_{нр} d\theta + c_{пл}) + 6,25d^2 \lambda\theta dt. \end{aligned} \quad (22)$$

Рассмотрим экспериментальные характеристики пережога проводника. На графике можно выделить характерную точку минимального тока, при котором процесс пережога возможен. Соответственно, при меньших токах процесс пережога не происходит. Значит, для начальной точки можно записать условия протекания установившегося режима без пережога: при $t \rightarrow \infty$, $d\theta = 0$, $\theta = T_{пл} - T_{ср}$, где $T_{пл}$ – температура плавления материала; $T_{ср}$ – температура окружающей среды. Уравнение теплового баланса примет вид:

$$\frac{i^2 R_d}{2} \left(1 - \sqrt{\left(\frac{R}{l_d}\right)^2 + 1} + \frac{R}{l_d} \right) dt = 6,25d^2 \lambda\theta dt; \quad (23)$$

$$\frac{i^2 R_d}{2} \left(1 - \sqrt{\left(\frac{R}{l_d}\right)^2 + 1} + \frac{R}{l_d} \right) = 6,25d^2 \lambda\theta. \quad (24)$$

Выразим λ :

$$\lambda = \frac{\frac{i^2 R_d}{2} \left(1 - \sqrt{\left(\frac{R}{l_d}\right)^2 + 1} + \frac{R}{l_d} \right)}{6,25d^2 \theta}. \quad (25)$$

Таким образом, можно определить значение λ для режима КЗ.

Рассмотрим процесс пережога проводника. При этом примем допущение, что пережог будет происходить, когда вся зона замыкания достигнет температуры плавления. В связи с линейной характеристикой процесса отдачи тепловой энергии в окружающую среду условно можно принять:

$$\Theta_{\text{ср}} = \frac{\Theta_{\text{пл}} + \Theta_0}{2}, \quad (26)$$

где $\Theta_{\text{пл}}$ – разница температур плавления и окружающей среды;

Θ_0 – начальная разница температур (≈ 40 °С).

Разница температур плавления и окружающей среды: $\Theta_{\text{пл}} = T_{\text{пл}} + T_{\text{ср}}$.

Таким образом, зная все численные параметры протекающего процесса пережога, можно определить его время из уравнения теплового баланса:

$$\frac{i^2 R_{\text{д}}}{2} \left(1 - \sqrt{\left(\frac{R}{l_{\text{д}}}\right)^2 + 1} + \frac{R}{l_{\text{д}}} \right) = \rho_{\text{пл}} 1,1977 d^3 \cdot (c_{\text{нр}} d\Theta + c_{\text{пл}}) + 6,25 d^2 \lambda \Theta dt; \quad (27)$$

$$\left(\frac{i^2 R_{\text{д}}}{2} \left(1 - \sqrt{\left(\frac{R}{l_{\text{д}}}\right)^2 + 1} + \frac{R}{l_{\text{д}}} \right) - 6,25 d^2 \lambda \Theta \right) dt = \rho_{\text{пл}} 1,1977 d^3 \cdot (c_{\text{нр}} d\Theta + c_{\text{пл}}); \quad (28)$$

$$dt = \frac{\rho_{\text{пл}} 1,1977 d^3 \cdot (c_{\text{нр}} d\Theta + c_{\text{пл}})}{\left(\frac{i^2 R_{\text{д}}}{2} \left(1 - \sqrt{\left(\frac{R}{l_{\text{д}}}\right)^2 + 1} + \frac{R}{l_{\text{д}}} \right) - 6,25 d^2 \lambda \Theta \right)}. \quad (29)$$

Определив время пережога выбранного провода для конкретных значений токов, можно построить характеристику пережога. Использование определенной этим способом зависимости в расчетах автоматических выключателей позволяет уточнить условия срабатывания электрической защиты.

Выводы

Предложенная методика может применяться для проведения аудита в сфере безопасности электроустановок 0,4 кВ. Также она может давать дополнительные возможности для анализа уже существующих и проектирования новых систем защиты и позволяет значительно расширить качество исследований в данной предметной области. Кроме того, это позволяет расширить возможности уже существующих методик оценки пожарной опасности объектов электроснабжения.

Однако главным ее достоинством является то, что данная технология позволит снять нерешаемость задачи, обусловленной снижением величи-

ны тока КЗ. Например, вследствие нагревания самих проводников или места КЗ или изменения характера самого замыкания с дугового на металлическое. Это, в свою очередь, может перевести работу аппарата защиты из зоны электромагнитного в зону теплового расцепителя. Новый подход значительно увеличивает качество расчета вероятностей срабатывания АЗ для конкретных конфигураций сетей электроснабжения и соответствующих систем обеспечения электро-, пожаро-безопасности.

Такой подход позволит в дальнейшем проводить подробную оценку рисков возникновения пожароопасных ситуаций по электрическим причинам на объектах 0,4 кВ.

Библиографический список

1. <http://www.mrsk-sib.ru> МРСК Сибири. Годовой отчет 2016. – URL http://www.mrsk-sib.ru/index.php?option=com_content&view=featured&Itemid=2527&lang=ru22 – Загл. с экрана (дата обращения 20.09.2018). – Текст: электронный.
2. <http://www.mrsk-sib.ru> МРСК Сибири. Годовой отчет 2015. – URL http://www.mrsk-sib.ru/index.php?option=com_content&view=featured&Itemid=2527&lang=ru22 – Загл. с экрана (дата обращения 20.09.2018). – Текст: электронный.
3. Смелков, Г. И. Пожарная опасность электропроводок при аварийных режимах / Г. И. Смелков. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 184 с. – Текст: непосредственный.
4. Германенко, В. С. Пожары от электроустановок: перспективные технологии безопасности / В. С. Германенко, О. К. Никольский, А. А. Сошников. – Текст: непосредственный // Социальная безопасность населения юга Западной Сибири: материалы Международной научно-практической конференции, «Региональные аспекты обеспечения социальной безопасности населения юга Западной Сибири – проблемы защиты от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» / под общей редакцией В. Н. Белоусова, С. И. Григорьева. – Барнаул: АзБука, 2003. – Вып. 1. – С. 34-35.

5. Сошников, А. А. Количественные показатели в технологиях безопасности / А. А. Сошников, Б. С. Компанец. – Текст: непосредственный // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4. – С. 119-123.
6. Varricchio S.L. Transient short-circuit calculations using time shifts and rational models - Preliminary results / S.L. Varricchio, J. Rossi, C.O. Costa, G.N. Taranto // SBSE 2018 – 7th Brazilian Electrical Systems Symposium, 2018. – P. 1-6.
7. Čonka Z. Short circuit current calculations / Z. Čonka, K. Máslo, B. Batora // 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2018 – Proceedings, 2018. P. 1-4.
8. Zhou, N., Wu, J., & Wang, Q. (2018). Three-Phase Short-Circuit Current Calculation of Power Systems with High Penetration of VSC-Based Renewable Energy. *Energies*. 11: 537.
9. Chen, T., Chen, M.S., Lee, W.-J., Kotas, P., van Olinda, P. (1991). Distribution system short circuit analysis - A rigid approach. *IEEE Transactions on Power Systems*. 7: 22-28.
10. Kim I. (2018). The effect of unbalanced impedance loads on the short-circuit current. *Energies*. 11 (6): 1447.
11. Fan C., Xu K., Liu Q. (2016). Short-circuit current calculation method for partial coupling transmission lines under different voltage levels. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 78: 647-654.
12. Volkov, M., Gusev, Yu., Monakov, Yu., Cho, G. (2016). The Effect of Current-Limiting Reactors on the Tripping of Short Circuits in High-Voltage Electrical Equipment. *Power Technology and Engineering*. 49: 1-3.
13. Mathur, A., Pant, V., Das, B. (2015). Unsymmetrical short-circuit analysis for distribution system considering loads. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 70.
14. Ramos M.J.S. Analysis of short-circuit asymmetrical currents in power distribution systems / M.J.S. Ramos, D.P. Bernardon, L. Comassetto, M. Resener, E.B. Daza // Proceedings of the Universities Power Engineering Conference. – 2012.
15. Cao, W., Wang, Y., Zhang, W., et al. (2012). Analysis on DC component in short-circuit current of power grid and its influence on breaking ability of circuit breakers. *Dianwang Jishu / Power System Technology*. 36: 283-288.
16. Kadkhodaei, G., Sheshyekani, K., Hamzeh, M. (2016). Coupled electric–magnetic–thermal–mechanical modelling of busbars under short-circuit conditions. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 10: 955-963.

References

1. <http://www.mrsk-sib.ru>. MRSK Sibiri. Godovoy otchet 2016. – URL http://www.mrsk-sib.ru/index.php?option=com_content&view=featured&Itemid=2527&lang=ru22. – Zagl. s ekrana (data obrashcheniya 20.09.2018).
2. <http://www.mrsk-sib.ru>. MRSK Sibiri. Godovoy otchet 2015. – URL http://www.mrsk-sib.ru/index.php?option=com_content&view=featured&Itemid=2527&lang=ru22. – Zagl. s ekrana (data obrashcheniya 20.09.2018).
3. Smelkov, G.I. Pozharnaya opasnost elektroprovodok pri avariynnykh rezhimakh. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 184 s.
4. Germanenko, V.S. Pozhary ot elektrustanovok: perspektivnye tekhnologii bezopasnosti / V.S. Germanenko, O.K. Nikolskiy, A.A. Soshnikov // Sotsialnaya bezopasnost naseleniya yuga Zapadnoy Sibiri: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Regionalnye aspekty obespecheniya sotsialnoy bezopasnosti naseleniya yuga Zapadnoy Sibiri – problema zashchity ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera» / pod obshch. red. V.N. Belousova, S.I. Grigoreva. – Barnaul: AzBuka, 2003. – Vyp. 1. – S. 34-35.
5. Soshnikov, A.A. Kolichestvennye pokazateli v tekhnologiyakh bezopasnosti / A.A. Soshnikov, B.S. Kompaneets // Polzunovskiy vestnik. – 2014. – No. 4. – S. 119-123.
6. Varricchio S.L. Transient short-circuit calculations using time shifts and rational models - Preliminary results / S.L. Varricchio, J. Rossi, C.O. Costa, G.N. Taranto // SBSE 2018 – 7th Brazilian Electrical Systems Symposium, 2018. – P. 1-6.

7. Čonka Z. Short circuit current calculations / Z. Čonka, K. Máslo, B. Batora // 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2018 – Proceedings, 2018. P. 1-4.
8. Zhou, N., Wu, J., & Wang, Q. (2018). Three-Phase Short-Circuit Current Calculation of Power Systems with High Penetration of VSC-Based Renewable Energy. *Energies*. 11: 537.
9. Chen, T., Chen, M.S., Lee, W.-J., Kotas, P., van Olinda, P. (1991). Distribution system short circuit analysis - A rigid approach. *IEEE Transactions on Power Systems*. 7: 22-28.
10. Kim I. (2018). The effect of unbalanced impedance loads on the short-circuit current. *Energies*. 11 (6): 1447.
11. Fan C., Xu K., Liu Q. (2016). Short-circuit current calculation method for partial coupling transmission lines under different voltage levels. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 78: 647-654.
12. Volkov, M., Gusev, Yu., Monakov, Yu., Cho, G. (2016). The Effect of Current-Limiting Reactors on the Tripping of Short Circuits in High-Voltage Electrical Equipment. *Power Technology and Engineering*. 49: 1-3.
13. Mathur, A., Pant, V., Das, B. (2015). Unsymmetrical short-circuit analysis for distribution system considering loads. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 70.
14. Ramos M.J.S. Analysis of short-circuit asymmetrical currents in power distribution systems / M.J.S. Ramos, D.P. Bernardon, L. Comassetto, M. Resener, E.B. Daza // Proceedings of the Universities Power Engineering Conference. – 2012.
15. Cao, W., Wang, Y., Zhang, W., et al. (2012). Analysis on DC component in short-circuit current of power grid and its influence on breaking ability of circuit breakers. *Dianwang Jishu / Power System Technology*. 36: 283-288.
16. Kadkhodaei, G., Sheshyekani, K., Hamzeh, M. (2016). Coupled electric-magnetic-thermal-mechanical modelling of busbars under short-circuit conditions. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 10: 955-963.



УДК 631.372

С.Н. Шуханов
S.N. Shukhanov

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАКТОРОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПУТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

IMPROVEMENT OF AGRICULTURAL TRACTOR ENGINE OPERATION BY MEANS OF AUTOMATIC REGULATION

Ключевые слова: сельскохозяйственное производство, автотракторная техника, автоматическое регулирование двигателя.

Инновационное развитие сельскохозяйственного производства предполагает создание технических средств и технологий, отвечающих современным требованиям. Особая роль в этой совокупности задач отводится автотракторному обеспечению агропромышленного комплекса. Эффективность работы автотракторного агрегата в значительной мере определяется рациональным использованием мощности двигателя. Одним из существенных спо-

собов совершенствования дизеля является микропроцессорное управление работой системы автоматического регулирования. Значительную часть времени тракторные дизели работают в условиях неуставившихся режимов. При переходном процессе нарушается согласование рабочих процессов отдельных элементов системы автоматического регулирования, что приводит к ухудшению смеобразования и сгорания топлива, снижению коэффициента избытка воздуха, повышению дымности и токсичности отработанных газов. Путем использования математического аппарата получены модели, описывающие работу системы автоматического регулирования двигателей ав-