

Экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы, что схема соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» обеспечивает высокий уровень симметрии вторичных напряжений даже при глубокой несимметрии нагрузки. При номинальном значении однофазной нагрузки коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности не превышает 1,67 %, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности не превышает 2,91 %.

Данная схема соединения обмоток может успешно применяться в электроустановках сельскохозяйственных потребителей при несимметрии нагрузки для повышения качества напряжения.

#### Л и т е р а т у р а

1. Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток : пат. № 16008 Респ. Беларусь / Збродыга В. М., Зеленкевич А. И. ; заявитель Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – № а 20100121 ; заявл. 2010.02.01 ; опубл. 30.06.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 3. – С. 180–181.
2. Прищепов, М. А. Особенности преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» / М. А. Прищепов, В. М. Збродыга, А. И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2017. – № 5. – С. 16–25.
3. Прищепов, М. А. Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке / М. А. Прищепов, В. М. Збродыга, А. И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2018. – № 6. – С. 25–31.
4. Зеленкевич, А. И. Симметрирование напряжения при использовании трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» / А. И. Зеленкевич, В. М. Збродыга, М. А. Прищепов // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., Саратов, 2020 г. / ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2020. – С. 14–18.
5. Прищепов, М. А. Экспериментальные исследования работы трансформаторов со схемами соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» и «звезда – звезда с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке / М. А. Прищепов, А. И. Зеленкевич, В. М. Збродыга // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24–25 окт. 2019 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. аграрный техн. ун-т ; редкол. И. Н. Шило [и др.]. – Минск, 2019. – Ч. 1. – С. 390–392.

## УЧЕТ ТЕПЛООВОГО ИМПУЛЬСА ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

**В. М. Лугачев**

*Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный  
технический университет», г. Минск*

Научный руководитель С. Г. Гапанюк

Короткое замыкание (КЗ) является одним из наиболее опасных режимов работы электрооборудования, так как токи могут достигать величин в разы, превышающие номинальные. Характер кривой тока, его величина и продолжительность в момент короткого замыкания являются сложной функцией времени, зависящей от места КЗ и параметров элементов, входящих в схему замещения. В свою очередь, время действия определяется качественным и количественным составом релейной защиты и автоматики. При выборе оборудования необходимо учесть термическое действие токов короткого замыкания на проводники, его длительность составляет всего несколько секунд, однако за такое время не успевает произойти теплообмен с окружающей средой, а значит, вся энергия, выделенная при прохождении сверхвысоких токов, расходуется на нагрев проводника. Для практических расчетов важно понять, до какой температуры успеет нагреться проводник при протекании по нему тока ко-

роткого замыкания, за время срабатывания защиты. Сравнив конечную температуру с допустимой, можно судить возможности применения токоведущих частей и (или) оборудования в рассматриваемой точке схемы. Для подробного изучения вопроса рассмотрим действие тока на токоведущие шины. Для остальных аппаратов рассуждения аналогичны, с поправкой на конструктивное исполнение.

Процесс нагрева проводника можно описать следующим уравнением [1]:

$$I_k^2 r_\vartheta dt = G c_\vartheta d\vartheta, \quad (1)$$

где  $I_k$  – действующее значение тока короткого замыкания;  $r_\vartheta$  – активное сопротивление проводника при данной температуре;  $G$  – масса проводника;  $c_\vartheta$  – удельная теплоемкость проводника при данной температуре.

Как видно, уравнение (1) существенно отяжелено тем, что сопротивление и теплоемкость меняются в зависимости от температуры, подставив эти зависимости получим уравнение:

$$\frac{1}{q^2} \int_0^{t_{откл}} I_k^2 \cdot dt = \int_{\vartheta_n}^{\vartheta_k} \gamma \frac{c_0(1 + \beta\vartheta)}{\rho_0(1 + \alpha\vartheta)} d\vartheta, \quad (2)$$

где  $q$  – площадь сечения проводника;  $\gamma$  – плотность материала проводника;  $c_0$  – теплоемкость материалов проводника при температуре 0 °С;  $\beta$  – температурный коэффициент теплоемкости;  $\rho_0$  – удельное активное сопротивление проводника при температуре 0 °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

Обозначим  $B_k = \int_0^{t_{откл}} I_k^2 dt$  – тепловой импульс короткого замыкания, в ГОСТах встречается под названием «интеграл Джоуля». Размерность интеграла Джоуля –  $A^2 \cdot c$ . Физический смысл состоит в том, что он выражает энергию в джоулях, которая выделится в цепи сопротивлением 1 Ом за время 1 с. Можно сказать, что интеграл Джоуля – температурная характеристика тока короткого замыкания, она показывает степень термического воздействия тока КЗ на проводник. Правую часть уравнения (2) обозначим как  $f/k$ , где  $k$  – коэффициент, учитывающий удельное сопротивление и эффективную теплоемкость проводника, который зависит от вида материала, из которого он изготовлен;  $f$  – сложная функция температуры проводника. После вставки всех обозначений получаем:

$$f_k = f_n + k \frac{B_k}{q^2}. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет найти величину  $f_k$ , зная которую, по графику на рис. 1 определяется конечная температура проводника  $\vartheta_k$ .

Интеграл Джоуля, согласно [2], можно определять как сумму интегралов от периодической  $B_{к.п}$  и аperiodической  $B_{к.а}$  составляющей тока КЗ:

$$B_k = B_{к.п} + B_{к.а}. \quad (4)$$

Методика расчета интеграла Джоуля зависит расчетной схемы установки, положения точки КЗ, ее удаленности от мощных генераторов, асинхронных двигателей и т. п.

В зависимости от этого выделяют четыре варианта расчетов:

1. Схема сети имеет произвольный вид, но для всех генераторов и синхронных компенсаторов она является удаленной. Удаленность определяется отношением действующего значения периодической составляющей тока КЗ в начальный момент к номинальному току генератора, двигателя и т. д. Установка считается удаленной, если отношение меньше двух.

2. Схема состоит из нескольких генераторов, компенсаторов или тому подобного, одинаково удаленных от точки КЗ, но для них оно является близким.

3. Схема точкой КЗ делится на две независимые части, одна содержит источники энергии, а другая – генераторы, компенсаторы и т. п. Причем для устройств одной части КЗ удаленное, а для второй – близкое.

4. Аналогично п. 1 в, только первая часть содержит удаленные источники, а вторая – близкие электродвигатели.

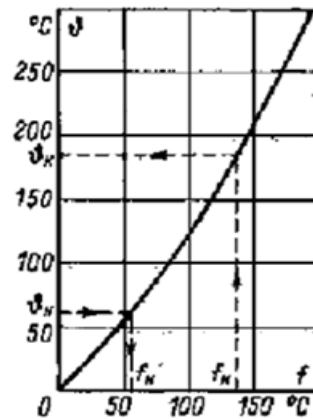


Рис. 1. Кривые для определения температуры нагрева проводников при коротком замыкании

Подробные формулы для расчета каждого из вариантов представлены в [2]. Следует отметить, что кроме действующего значения периодической составляющей тока КЗ, на  $B_k$  существенное влияние оказывает эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, которая зависит от соотношения активного и реактивного сопротивления линии. Причем, если время отключения больше трехкратной эквивалентной постоянной времени, то расчет становится менее громоздким.

Саму расчетную точку КЗ для проверки на термическую стойкость выбирают так, чтобы ток КЗ, протекающий через расчетный проводник, был максимален. За расчетный вид КЗ берут трехфазное КЗ, для проверки проводников в цепях генераторов расчетным током короткого замыкания может быть двухфазное КЗ, если оно обуславливает больший нагрев проводников при сравнении с трехфазным КЗ.

Степень воздействия тока КЗ на проводник, согласно (3), кроме прочего зависит и от рода проводника (коэффициент  $k$ ) и от площади его сечения  $q$ , изменяя эти параметры, и выбирают сечения проводников оборудования.

Сам ток КЗ, его характер определяются очень сложным сочетанием факторов, регулировка которых довольно сложна и не всегда возможна. Самый простой способ – установка более быстродействующей и совершенной защиты, однако ее возможности также существенно ограничены.

Если рассмотреть формулу (3), то при расчете конечной температуры провод-

ника при КЗ начальным условием является температура проводника в условиях номинального установившегося режима, за это отвечает  $f_n$ . Начальная температура в установившемся режиме должна быть равна длительно допустимой температуре и составлять 70 °С. Конечная температура в момент отключения КЗ не должна превышать предельно допустимую, которая варьируется от рода материала, для алюминия это 200 °С [1]. Таким образом, при КЗ температура проводника может безопасно вырасти на 130 °С. За величину роста температуры, исходя из уравнения (3), отвечает слагаемое  $k \frac{B_k}{q^2}$ . Таким образом, если величина интеграла Джоуля обеспечивает прирост температуры на величину, близкую или большую, чем 130 °С, необходимо проводить проверку токоведущих частей на тепловую стойкость при КЗ. Однако, как показывает практика расчетов, реальные тепловые импульсы редко достигают подобных значений.

На основании практических расчетов можно сделать вывод, что для жестких алюминиевых при  $\frac{B_k}{q^2} < (7,5 - 8)10^{-3}$  допускается проверка на термическую стойкость не проводить. При помощи аналогичных рассуждений можно получить величину отношения  $\frac{B_k}{q^2}$  для других материалов, а задавшись величиной минимальной площади, можно получить отдельно величину самого интеграла Джоуля и ориентировочную величину тока КЗ, которая позволит принять решение о необходимости проведения детальных расчетов по [2] для проверки токоведущих частей по термической стойкости при коротком замыкании.

#### Литература

1. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций : учеб. для техникумов / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – 2-е изд, перераб. – М. : Энергия, 1980.
2. ГОСТ Р 52736–2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. – М. : Стандартинформ, 2007.

### **СВЕРТОЧНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕЖВИТКОВОГО ЗАМЫКАНИЯ В ТРАНСФОРМАТОРЕ**

**И. Л. Громыко**

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет  
транспорта», г. Гомель*

Научный руководитель В. Н. Галушко

Одним из наиболее распространенных следствий ухудшения свойств изоляции являются межвитковые замыкания. При межвитковом замыкании изоляция обмотки нарушается и происходит ее пробой между витками, что впоследствии может привести к выходу из строя трансформатора.

В качестве объекта исследования использовались однофазные трансформаторы малой мощности с воздушным охлаждением. В ходе экспериментов при изменяющейся нагрузке трансформатора выполнялось межвитковое замыкание различного числа витков на одной фазе первичной и вторичной обмоток. Схема экспериментальной установки по исследованию межфазного короткого замыкания (МКЗ) трансформатора представлена на рис. 1.