

## РАБОТА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА СО СХемой СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА – ДВОЙНОЙ ЗИГЗАГ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ» ПРИ ОДНОФАЗНОЙ НАГРУЗКЕ

А. И. Зеленкевич, В. М. Збродыга

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

Научный руководитель М. А. Прищепов

Несимметрию напряжений обуславливает несимметрия электрических нагрузок. При этом трехфазные электроприемники питаются несимметричным напряжением, а однофазные – оказываются под повышенным или пониженным напряжением. Отклонение напряжения у электроприемников может превысить допустимое значение.

При несимметричном режиме существенно ухудшаются условия работы как самих электроприемников, так и иных элементов сети, снижается надежность работы электрооборудования и системы электроснабжения в целом. Несимметрия токов и напряжений вызывает дополнительные потери мощности, снижает срок службы электрооборудования, уменьшает экономические показатели его работы.

Уменьшить несимметрию напряжений можно применением специальных корректирующих устройств. При выборе способов и средств повышения качества электроэнергии авторы считают целесообразным применение относительно недорогих, простых и надежных по конструктивному исполнению устройств, которые не требуют особых условий эксплуатации и не предъявляют высоких требований к квалификации обслуживающего персонала. Одним из средств повышения качества напряжения являются трансформаторы со специальными схемами соединения обмоток. В системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей авторы рассматривают возможность использования для этого трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» [1], [2].

Проведенные авторами теоретические исследования работы трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке, в том числе принцип компенсации симметричных составляющих нулевой последовательности [3], [4], подтвердили, что снижение несимметрии напряжений происходит вследствие компенсации составляющих нулевой последовательности, а их остаточные значения обусловлены падениями напряжений от токов нулевой последовательности на активных сопротивлениях фаз вторичной обмотки. Вторичная обмотка самостоятельно уравнивает свои намагничивающие силы нулевой последовательности, устраняя процесс дополнительного подмагничивания ими магнитопровода. При этом магнитная система трансформатора уравнивается.

Также авторами были проведены экспериментальные исследования, подтверждающие способность трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» обеспечивать наиболее высокий уровень симметрии напряжений на его выводах по сравнению с другими схемами при несимметричном характере нагрузки [5].

Рассматривался режим, когда ток в одной из фаз изменялся в пределах от 0 до  $1,2I_n$ , а в двух других фазах был равен нулю.

Измерялись линейные и фазные напряжения трансформаторов высшей и низшей сторон, токи низшей стороны, коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности при помощи анализатора качества напряже-

ния Fluke 425. Коэффициенты несимметрии первичных напряжений по обратной  $K_{2U}$  и нулевой  $K_{0U}$  последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» практически равны нулю. Зависимости коэффициентов несимметрии напряжений вторичной стороны от токов нагрузки приведены на рис. 1 и 2, из которых видно, что рост несимметрии нагрузки вызывает увеличение коэффициентов несимметрии напряжений.

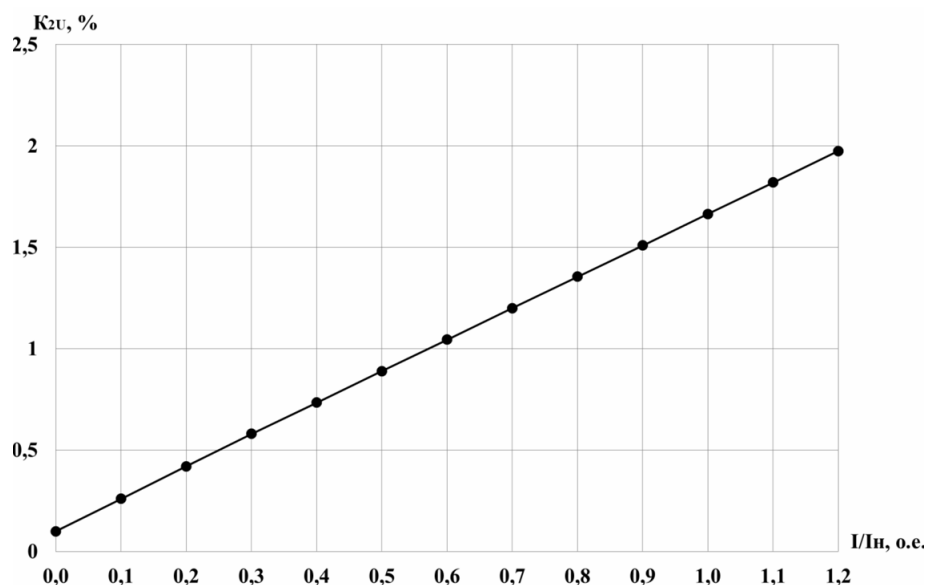


Рис. 1. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от тока нагрузки для трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима  $I_a = 0-1,2 I_n$ ,  $I_b = 0$ ,  $I_c = 0$

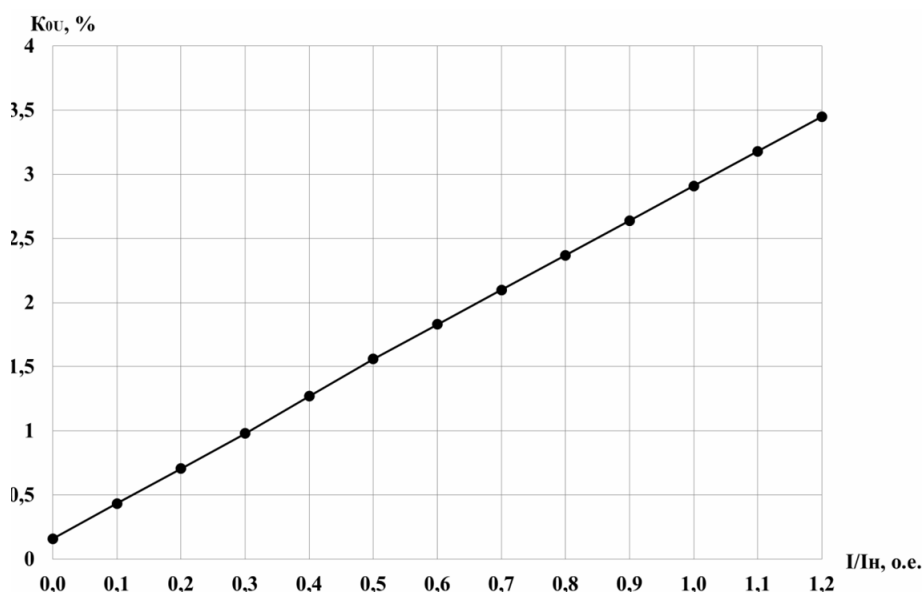


Рис. 2. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности от тока нагрузки для трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима  $I_a = 0-1,2 I_n$ ,  $I_b = 0$ ,  $I_c = 0$

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) существенноотяжелено 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.