

образом учитывать удельные расходы электроэнергии на эту закачку каждым насосом, если измерительная аппаратура позволяет это. При определении приоритетов на отключение агрегата в этом случае и при прочих равных условиях следует руководствоваться тем положением, что как в зоне пиковых, так и других нагрузок наименьшее число часов должен работать агрегат с наилучшими энергоэкономическими характеристиками.

УДК 621.314.224

## **ВЫЯВЛЕНИЕ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ВИТКОВ ВО ВТОРИЧНЫХ ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА МЕТОДОМ ЦИФРОВОГО ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЯ ТОКОВ, НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СНЯТИИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Докт. техн. наук СОПЬЯНИК В. Х., инженеры ВЛАСОВ А. И., ГЛУШОНОК Е. А.

*Научно-исследовательское и проектное республиканское  
унитарное предприятие «БЕЛТЭИ»*

Надежность функционирования устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) в установившихся и переходных режимах короткого замыкания (КЗ) во многом зависит от точности работы трансформаторов тока (ТТ).

В инструкции по проверке ТТ, используемых в схемах релейной защиты [1] (в дальнейшем – Инструкция), отмечается, что вольт-амперные характеристики (ВАХ) ТТ являются основой при оценке исправности и определении погрешности их работы. Наиболее распространенная неисправность ТТ – витковое замыкание во вторичных обмотках, которые выявляются по резкому снижению ВАХ и изменению ее крутизны. Согласно Инструкции ВАХ ТТ должны сниматься при новом включении и полных плановых проверках ТТ при практически синусоидальном напряжении [1]. При этом ток намагничивания измеряется двумя амперметрами, реагирующими на действующее и амплитудное значения тока. По результатам замеров строятся две ВАХ ТТ: первая – для сравнения с типовой характеристикой, вторая – для контроля исправности ТТ при последующих проверках. Однако из-за отсутствия амплитудных амперметров на практике, как правило, снятие ВАХ ТТ производится с использованием амперметра и вольтметра действующих значений. Снятая таким методом ВАХ ТТ не обеспечивает построение амплитудной характеристики намагничивания, как того требует Инструкция.

В [2] изложена методика снятия ВАХ ТТ путем цифрового осциллографирования (ЦО) токов, напряжений и приведено описание разработанной компьютерной программы (КП) обработки цифровых осциллограмм. Результаты обработки КП цифровых осциллограмм токов и напряжений ВАХ ТТ включают: гармонический анализ подводимого напряжения к ТТ и протекающего тока во вторичной обмотке, расчет их действующих, средних

и амплитудных значений, амплитудных значений индукции и напряженности характеристики намагничивания (АХН) магнитопровода ТТ.

С целью изучения и анализа токов, напряжений ВАХ и АХН ТТ и установления новых признаков, указывающих на наличие короткозамкнутых витков (КЗВ) во вторичных обмотках ТТ, было проведено ЦО токов и напряжений 15 точек ВАХ исправного ТТ и ТТ с одним короткозамкнутым витком во вторичной обмотке. Испытания проводились на ТТ типа Т-0,66УЗ 50/5:  $W_1 = 3$  вит.,  $W_2 = 30$  вит. Количество выборок мгновенных значений токов и напряжений ВАХ ТТ на одном периоде промышленной частоты при их цифровом осциллографировании составляло 20 значений.

Результаты обработки КП ЦО токов и напряжений ВАХ исправного ТТ и ТТ с одним короткозамкнутым витком во вторичной обмотке приведены на рис. 1 в виде следующих кривых ВАХ: 1 – действующих значений  $U_d = f(I_d)$ ; 2 – средних значений  $U_{cp} = f(I_{cp})$ ; 3 – амплитудных значений  $U_{ам} = f(I_{ам})$  для исправного ТТ и 4 – действующих значений  $U_d = f(I_d)$ ; 5 – средних значений  $U_{cp} = f(I_{cp})$  для ТТ с одним короткозамкнутым витком во вторичной обмотке. На рис. 1 по оси абсцисс отложены действующие, средние и амплитудные значения токов, что позволяет рассчитать степень искажения формы кривых токов в различных точках ВАХ ТТ. По оси ординат отложены действующие значения напряжений  $U_d$ , и если вместо них поставить значения  $U_{cp}/U_{ам}$ , то получим кривые средних  $U_{cp} = f(I_{cp})$  и амплитудных  $U_{ам} = f(I_{ам})$  значений ВАХ.

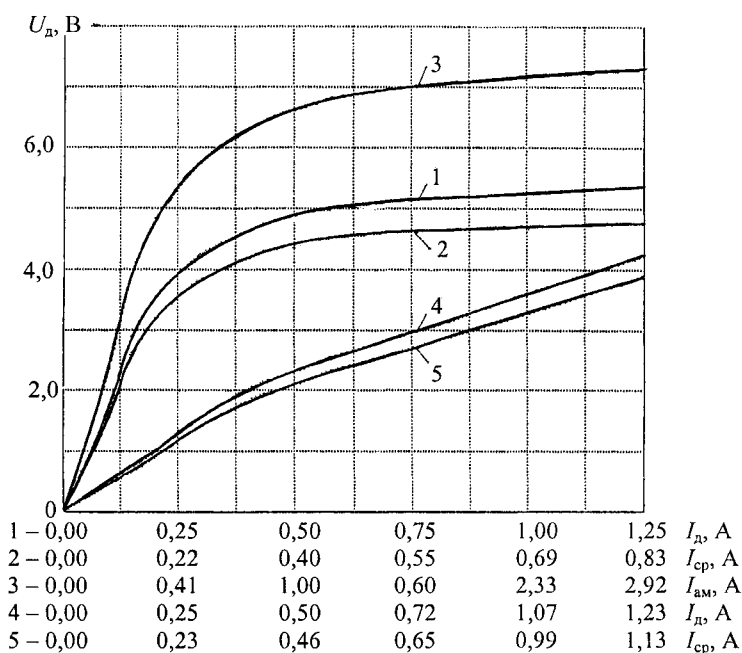


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики исправного ТТ (ВАХ-1, 2, 3) и ТТ с короткозамкнутым витком (ВАХ-4, 5)

Синусоидальность подведенного напряжения ко вторичной обмотке при снятии ВАХ ТТ более точно определяется методом гармонического анализа его ЦО, который реализован в КП обработки ЦО токов, напряжений ВАХ ТТ.

При проведении эксперимента снятия ВАХ ТТ гармонический анализ подведенного напряжения показал, что оно практически синусоидальное и

в нем отсутствуют высшие гармоники, а отношение  $U_d : U_{cp} = 1 : 1$ . Следует заметить, что в начальной части ВАХ ТТ ток намагничивания синусоидален. С увеличением подводимого напряжения происходит насыщение магнитопровода ТТ, ток намагничивания становится несинусоидальным и отношение  $I_d : I_{cp}$  увеличивается, также увеличивается  $I_{ам} : I_d$  и уменьшается отношение первой гармоники к полному току. Эти признаки указывают на отсутствие КЗВ во вторичных обмотках ТТ.

Сопоставление кривых действующих, средних ВАХ исправного ТТ с соответствующими кривыми ВАХ ТТ, имеющего КЗВ во вторичной обмотке, показывает, что ВАХ ТТ с КЗВ расположены значительно ниже по отношению к ВАХ исправного ТТ. При этом как действующая, так и средняя ВАХ ТТ с КЗВ во вторичной обмотке в широком диапазоне практически линейные. Из-за линейности ВАХ ТТ с КЗВ протекающий ток во вторичной обмотке синусоидален. Полученные результаты подтверждают выводы [2].

Следует отметить, что полученные результаты цифрового осциллографирования токов, напряжений ВАХ и их компьютерная обработка в виде действующих, средних, амплитудных значений ВАХ и результаты гармонического анализа токов, напряжений ВАХ позволяют установить наличие КЗВ во вторичных обмотках ТТ.

Для повышения точности результатов расчета действующих, средних и амплитудных значений токов и напряжений ВАХ ТТ и амплитудных значений индукций и напряженностей характеристики намагничивания ТТ необходимо иметь значения следующих конструктивных данных ТТ: количество витков вторичной обмотки  $W_2$ , сечение стали  $S$  и среднюю длину  $L$  магнитопровода, активное  $R_{об}$  и индуктивное  $X_s$  сопротивления вторичной обмотки. Частота опроса цифровым осциллографом токов, напряжений при снятии ВАХ ТТ должна быть порядка 5000 Гц, что соответствует 100 выборкам их мгновенных значений на одном периоде промышленной частоты. Такими возможностями обладает многоканальный цифровой регистратор типа «Рекон-08МС» [4].

## ВЫВОДЫ

1. Метод цифрового осциллографирования токов, напряжений при снятии вольт-амперных характеристик ТТ и их компьютерная обработка позволяют автоматизировать расчеты, формировать протоколы испытаний, создавать в ЭВМ базу данных испытаний ТТ, включающую дату снятия вольт-амперных характеристик ТТ, его тип и заводской номер, результаты компьютерной обработки цифровых осциллограмм токов, напряжений: действующие, средние, амплитудные значения вольт-амперных характеристик и характеристик намагничивания ТТ.

2. Рассчитанные вольт-амперные характеристики ТТ используются для выявления короткозамкнутых витков во вторичной обмотке путем сопоставления их с первоначальными ВАХ ТТ.

3. Результаты гармонического анализа тока, напряжения ВАХ ТТ, полученные с помощью разработанной компьютерной программы, и их осциллограммы позволяют установить наличие короткозамкнутых витков во вторичных обмотках ТТ.

4. Полученные реальные амплитудные характеристики намагничивания ТТ используются для уточненных расчетов при заданных токах КЗ процес-

сов в ТТ и вторичных токов в цепях РЗ с помощью компьютерных программ [3]. Полученные при этом цифровые осциллограммы токов с учетом работы ТТ, схем соединения вторичных обмоток ТТ могут быть использованы в качестве исходной информации в испытательных системах типа «Ретом» для оценки поведения РЗ в различных режимах короткого замыкания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1977. – 89 с.
2. Методика снятия и расчета вольт-амперных характеристик и характеристик намагничивания трансформаторов тока на основе цифровых технологий / В. Х. Сопьяник, А. И. Власов, Е. А. Глушонок, В. Л. Радюк // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2003. – № 5. – С. 5–10.
3. Сопьяник В. Х. Расчет и анализ переходных и установившихся процессов в трансформаторах тока и токовых цепях устройств релейной защиты. – Мн.: БГУ, 2000. – 143 с.
4. Иванилов Б. В., Заболотный И. П. Оценка технологии регистрации и обработка информации // Электрические станции. – 2003. – № 9. – С. 40–45.

Поступила 3.03.2004

УДК 621.3.066.6

### РАСЧЕТ НАГРЕВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ НА ОСНОВЕ ДВУХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Докт. техн. наук, проф. **ГЕРАСИМОВИЧ А. Н.**,  
канд. техн. наук **ГЕРАСИМОВИЧ Д. А.**, инж. **КЛИМОВИЧ Ю. А.**

*Белорусский национальный технический университет,  
Минские кабельные сети РУП «Минскэнерго»,  
Пинские электрические сети РУП «Брестэнерго»*

В [1] рассмотрен расчет нагрева плоских контактных соединений на основе одномерной модели температурного поля. Такая модель предполагает неизменность температуры по толщине соединения. В расчетах учитывается только неравномерность тепловыделения по длине. Однако проведенные расчеты показали, что резко неравномерное распределение тепловыделения даже для коротких контактов (длина соизмерима с толщиной) приводит к значительному увеличению температуры на их краях, особенно в переходных режимах при коротких замыканиях. Плоским контактным соединениям присуща неравномерность тепловыделения не только по длине, но и по толщине. Резкая неравномерность распределения джоулевой теплоты в первую очередь характерна для контактов с хромоникелевыми защитными покрытиями [2]. Последние обладают худшими электро- и теплопроводящими свойствами по сравнению со свойствами соединяемых проводников. Полученные для таких контактов расчетные температуры по