

УДК 621.314.224

МЕТОДИКА СНЯТИЯ И РАСЧЕТА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧИВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

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

*Научно-исследовательское и проектное
республиканское унитарное предприятие «БелТЭИ»,
Концерн «Белэнерго»*

Рост токов короткого замыкания (КЗ), увеличение нагрузок на трансформаторы тока (ТТ), наличие ТТ с немагнитным зазором в магнитопроводе и постоянно возрастающие требования к устройствам релейной защиты и автоматики (РЗА) в части быстродействия, чувствительности и селективности обуславливают необходимость разработки более точных методов выявления короткозамкнутых витков во вторичных обмотках ТТ, расчета погрешностей работы ТТ в переходных и установившихся режимах КЗ, изучения процессов в трехфазных токовых цепях в режиме КЗ и их влияния на поведение РЗ.

В Правилах устройства электроустановок (ПУЭ) [1] приведены четкие требования к точности работы ТТ в цепях РЗА. Однако эти требования распространяются на работу ТТ в установившихся режимах КЗ и, как правило, выполняются при проектировании РЗ и эксплуатации [2]. В реальности же имеем постоянное развитие энергосистем путем ввода новых мощностей, линий электропередачи, а также рост токов КЗ. При этом совершенствование устройств РЗ развивается по пути повышения их быстродействия, чувствительности. И, как результат, большинство РЗ функционируют в переходных режимах КЗ и должны обеспечивать селективные действия, когда ТТ насыщаются и работают с большими погрешностями, а вторичные токи в цепях РЗ содержат основную периодическую составляющую, апериодическую и свободные периодические составляющие с широким спектром высших частот.

Для повышения надежности работы эксплуатируемых и проектируемых устройств РЗА разработаны компьютерные программы [3], обеспечивающие методом вычислительного эксперимента при заданных токах КЗ расчет погрешностей работы ТТ с учетом реальных характеристик намагничивания ТТ, схем соединения вторичных обмоток ТТ, реальных вторичных нагрузок, создание цифровых осциллограмм (ЦО) вторичных токов.

ЦО вторичных токов с помощью испытательной установки «РЕЛЕ-ТОМОГРАФ» позволяют оценить поведение РЗА в различных заданных переходных и установившихся режимах КЗ с учетом реальной схемы соединения эксплуатируемых ТТ и их вторичных нагрузок.

При расчетах на ПЭВМ [3] процессов в ТТ в режиме КЗ использование амплитудных характеристик намагничивания реальных ТТ и их вторичных нагрузок повышает точность результатов расчета погрешностей работы ТТ, токов во вторичных цепях РЗА и их цифровых осциллограмм [4].

Инструкцией [2] отмечается, что при установке ТТ целесообразно снимать вольт-амперную характеристику (ВАХ), измеряя ток двумя амперметрами, реагирующими на действующее и амплитудное значения тока, а напряжение измерять вольтметром, реагирующим на среднее значение, и строить две ВАХ ТТ: первую (действующую) для сравнения с типовой характеристикой и вторую для контроля исправности ТТ при последующих проверках [2, с. 26]. Проверка ВАХ ТТ с помощью вольтметра, реагирующего на среднее значение напряжения U_2 , и амплитудного амперметра весьма удобна для периодического контроля неизменности характеристик, поскольку такой способ исключает влияние формы кривых напряжения и тока на результаты измерения.

Рекомендуемые в [2] действующие, средние и амплитудные ВАХ ТТ могут быть сняты по схеме, приведенной на рис. 1.

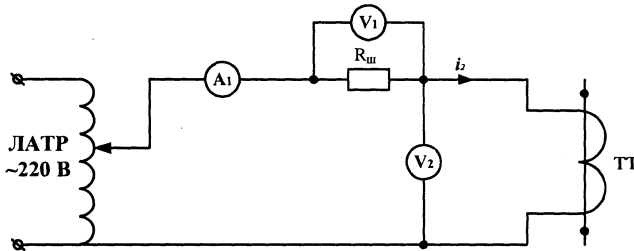


Рис. 1. Схема снятия вольт-амперных характеристик трансформаторов тока: A_1 – амперметр средних значений; V_1 – вольтметр амплитудных значений; V_2 – то же средних значений (детекторный); $R_{ш}$ – калиброванный резистор

Амплитудные значения тока намагничивания вычисляются по следующей зависимости:

$$I_{ам} = \frac{U_1}{R_{ш}}, \quad (1)$$

где U_1 – показания амплитудного вольтметра.

ЭДС вторичной обмотки равна

$$E_{cp} = U_{2cp} - I_{cp} Z_{2об}, \quad (2)$$

где $Z_{2об}$ – полное сопротивление вторичной обмотки ТТ; I_{cp} – среднее значение тока намагничивания ТТ.

Амплитудные значения индукции и напряженности характеристики намагничивания ТТ рассчитываются по следующим зависимостям:

$$B_{max} = \frac{E_{cp}}{4fW_2S}; \quad (3)$$

$$H_{\max} = \frac{W_2}{l} I_{\text{ам}}, \quad (4)$$

где f – частота сети, Гц; W_2 – число витков вторичной обмотки ТТ; S – сечение стали магнитопровода ТТ, м²; l – средняя длина магнитопровода ТТ, м.

Для построения вольт-амперной характеристики ТТ и характеристики намагничивания $B_{\max} = f(H_{\max})$ необходимо экспериментально снять порядка 15 точек вольт-амперной характеристики ТТ, а также иметь значения конструктивных параметров ТТ: $W_1, W_2, S, l, R_{2\text{об}}, X_s$.

Однако, как показывает опыт эксплуатации ТТ в энергосистемах, использование средних, амплитудных ВАХ ТТ практически не востребовано, и только снятые действующие значения ВАХ ТТ используются для сопоставления с паспортными данными ТТ с целью выявления наличия короткозамкнутых витков в их вторичных обмотках.

Результаты полученных средних, амплитудных значений ВАХ ТТ могут быть использованы для вычисления и построения амплитудных характеристик намагничивания ТТ $B_{\max} = f(H_{\max})$. Снятые характеристики намагничивания ТТ используются для уточненных расчетов методом вычислительного эксперимента значений вторичных токов в цепях РЗА в переходных и установившихся режимах КЗ [3] и их цифровых осциллограмм. Полученные ЦО вторичных токов и введенные в испытательную систему «РЕЛЕ–ТОМОГРАФ» [5] позволяют на принципиально новом техническом уровне качественно и объективно (с учетом процессов в реальных токовых цепях при заданных токах КЗ) оценить поведение устройств РЗА в переходных и установившихся режимах КЗ.

Исходя из наличия в эксплуатации переносных цифровых осциллографов (ПЦО) для регистрации и анализа процессов в электрических цепях разработана на их основе и усовершенствована методика снятия ВАХ ТТ, обеспечивающая повышенную точность результатов расчета действующих, средних, амплитудных значений токов, напряжений ВАХ, амплитудных характеристик намагничивания ТТ, выявления короткозамкнутых витков во вторичных обмотках ТТ.

Если в традиционной схеме снятия ВАХ ТТ (рис. 1) исключить $R_{\text{ш}}, V_1$, измеряющие амплитудные значения токов, а подаваемые ток и напряжение во вторичную обмотку ТТ завести в ПЦО, то получим схему (рис. 2), обеспечивающую снятие мгновенных значений токов, напряжений ВАХ ТТ. Измерительные приборы A_1, V_2 следует оставить в схеме для визуального контроля за подаваемыми током и напряжением во вторичную обмотку ТТ.

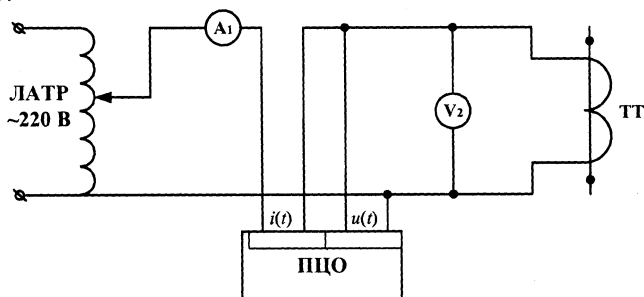


Рис. 2

Цифровое осциллографирование ВАХ ТТ производится с использованием схемы с автотрансформатором как обеспечивающей наименьшее искажение синусоиды напряжения и рекомендуемой Инструкцией [2]. По результатам регистрации сигналов тока и напряжения цифровым осциллографом формируется файл их мгновенных значений, который обрабатывается разработанной для этих целей компьютерной программой (КП) обработки ЦО и расчета ВАХ ТТ. КП учитывает количество выборок мгновенных значений тока, напряжения, производимых цифровым осциллографом на периоде $T = 0,02$ с, и обеспечивает ввод с клавиатуры значений конструктивных параметров ТТ (W_2 – количество витков вторичной обмотки; S – сечение стали магнитопровода, m^2 ; l – средняя длина магнитопровода, м; $Z_{2об}$ – полное сопротивление вторичной обмотки, Ом). КП производит гармонический анализ напряжения, тока ВАХ и расчет среднеквадратичных, средневыпрямленных и амплитудных значений токов, напряжений ВАХ ТТ.

Среднеквадратичные (действующие) значения тока (напряжения) за период $T = 0,02$ с вычисляются по следующей зависимости:

$$I_d = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\frac{i_0^2}{2} + i_1 + i_2 + \dots + i_{n-1} + \frac{i_n^2}{2} \right)}, \quad (5)$$

где $i_0, i_1, i_2, \dots, i_{n-1}, i_n$ – мгновенные значения тока ЦО за период T ; n – количество выборок мгновенных значений тока (напряжения) ПЦО на периоде T .

Средневыпрямленные значения тока (напряжения) за период $T = 0,02$ с вычисляются по методу трапеций

$$I_{cp} = \frac{1}{n} \left(\frac{|i_0|}{2} + |i_1| + |i_2| + \dots + |i_{n-1}| + \frac{|i_n|}{2} \right), \quad (6)$$

где $|i_0|, |i_1|, |i_2|, \dots, |i_{n-1}|, |i_n|$ – абсолютные мгновенные значения тока ЦО за период T .

Амплитудные значения тока $I_{ам}$, напряжения $U_{ам}$ ВАХ ТТ за период T в КП определяются путем сравнения их абсолютных мгновенных значений и выявления максимальных.

Расчет амплитудных значений индукций, напряженностей характеристики намагничивания ТТ производится по зависимостям (3), (4).

Для повышения точности результатов расчета действующих, средневыпрямленных и амплитудных значений токов, напряжений ВАХ и характеристик намагничивания ТТ целесообразно, чтобы частота выборки мгновенных значений ПЦО была порядка 40 значений на периоде.

Результаты обработки цифровых осциллограмм ВАХ ТТ на ПЭВМ выдаются на печать в виде протокола снятия ВАХ ТТ, который содержит число снятых точек на ВАХ ТТ, конструктивные данные ТТ и результаты расчета действующих, средних, амплитудных значений токов, напряжений ВАХ и амплитудные значения индукций и напряженностей характеристики намагничивания ТТ.

Для построения ВАХ (действующих, средних, амплитудных значений) и амплитудной характеристики намагничивания ТТ необходимо выполнять осциллографирование мгновенных значений токов и напряжений порядка 15 точек на ВАХ ТТ.

При снятии ВАХ ТТ для сравнения напряжения снимаемой ВАХ с заводскими данными обязательно следует задавать значения токов, приведенных в паспорте ТТ.

Полученная и обработанная на ПЭВМ информация о ВАХ ТТ может стать основой для создания базы данных эксплуатируемых ТТ.

На рис. 3 приведены осциллограммы тока и напряжения одной точки ВАХ ТТ типа Т-0,66У3 50/5 (конструктивные параметры ТТ определены экспериментально: $W_1 = 3$ вит.; $W_2 = 30$ вит.; $S = 0,000476$ м²; $l = 0,1739$ м; $Z_{2об} = 0,046$ Ом) и результаты обработки ЦО ВАХ ТТ ($U_d = 3,78$ В; $U_{cp} = 3,482$ В; $U_{ам} = 5,05$ В; $I_d = 0,24$ А; $I_{cp} = 0,227$ А; $I_{ам} = 0,358$ А; $E_{cp} = 3,472$ В; $B_{ам} = 1,216$ Тл; $H_{ам} = 61$ А/м).

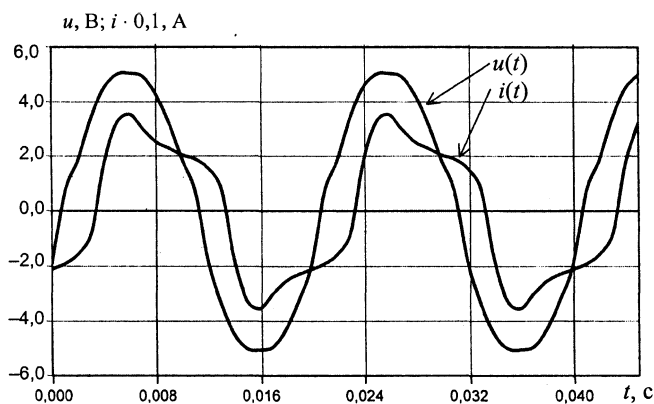


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения одной точки вольт-амперной характеристики ТТ, построенные по результатам цифрового осциллографирования

ВЫВОДЫ

На основе цифровых технологий (использование переносного цифрового осциллографа и разработанной компьютерной программы) усовершенствована методика снятия, регистрации мгновенных значений ВАХ ТТ, гармонического анализа токов, напряжений ВАХ, расчета действующих, средних, амплитудных значений токов, напряжений и амплитудных характеристик намагничивания ТТ. Методика характеризуется повышенной точностью результатов расчета, возможностью сопоставления полученных данных ВАХ ТТ с паспортными и выявления короткозамкнутых витков во вторичных обмотках ТТ.

ВАХ ТТ и их характеристики намагничивания совместно с конструктивными данными ТТ, реальной вторичной нагрузкой по фазам, схемами соединения вторичных обмоток ТТ могут стать основой создания баз данных эксплуатируемых ТТ, обеспечивающих совместно с КП [3] уточненный расчет погрешностей работы ТТ, информационных параметров входных сигналов устройств РЗА и ЦО вторичных токов для оценки поведения РЗА с помощью испытательной установки «РЕЛЕ-ТОМОГРАФ» в переходных и установившихся режимах заданного КЗ и процессов во вторичных токовых цепях.

ЛИТЕРАТУРА

1. П р а в и л а устройства электроустановок (ПУЭ). – 6-е изд. – М.: Госэнергонадзор, 2000.
2. И н с т р у к ц и я по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1977. – 89 с.
3. С о п ь я н и к В. Х. Расчет и анализ переходных и установившихся процессов в трансформаторах тока и токовых цепях устройств релейной защиты. – Мн.: БГУ, 2000. – 143 с.
4. С о п ь я н и к В. Х., Ж у к Е. И. Расчет и анализ на ПЭВМ процессов в трансформаторах тока с учетом их характеристик намагничивания и вторичных нагрузок // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 5. – С. 33–29.
5. П р и м е н е н и е и техническое обслуживание микропроцессорных устройств на электростанциях и в электросетях. Ч. 4: Испытательные установки для проверки устройств релейной защиты и автоматики (серия «РЕТОМ») / Сост. А. Н. Бирг, В. Н. Дмитриев, В. А. Герасимов, С. М. Кузьмин; Под ред. Б. А. Алексеева. – М.: Из-во НЦ ЭНАС, 2000. – 56 с.
6. С о п ь я н и к В. Х., Ж а м о й д и н А. А., Л о м о н о с о в А. В. Математическая обработка цифровых осциллограмм электрических аналоговых параметров аварийного режима // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 4. – С. 16–21.

Поступила 28.01.2003

УДК 621.3.066.6

РАСЧЕТ НАГРЕВА ПЛОСКИХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ НА ОСНОВЕ ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Канд. техн. наук ГЕРАСИМОВИЧ Д. А.

ПТООО «Сузор'е Льва»;

инж. КЛИМОВИЧ Ю. А.

Пинские электрические сети РУП «Брестэнерго»;

канд. техн. наук МИШКИНА М. А., инж. ЕЖЕНКОВ Г. Г.

Белорусский национальный технический университет

Контактные соединения должны удовлетворять требованиям устойчивой и надежной работы в нормальных режимах и режимах коротких замыканий. В указанных случаях температуры контактов не должны превышать нормируемые [1].

Температурное состояние контакта определяется выделяемой в нем джоулевой теплотой (тепловыделением), а также его тепловыми и электрическими свойствами. Существенные трудности в расчете температур воз-