

# Производственные испытания дифференциальной защиты трансформатора с поясами Роговского

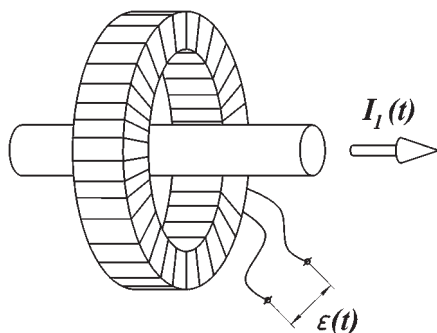
**А.А. Суворов**, аспирант, **В.Е. Глазырин**, к.т.н., доцент, **В.П. Ерушин**, к.т.н., доцент, кафедра электрических станций, Новосибирский государственный технический университет

В последнее время все чаще упоминается об успешном внедрении воздушных трансформаторов или катушек Роговского в области релейной защиты и автоматики. В России их можно встретить, например, в качестве датчиков токовых защит комплектной трансформаторной силовой подстанции (КТСП) шахтного исполнения. Для обеспечения защиты трансформатора, входящего в состав КТСП, желательна установка токовой продольной дифференциальной защиты (ДЗ), однако её применение для трансформаторов такой мощности не всегда обязательно. Также из-за компактности КТСП установка необходимых для такой защиты трансформаторов тока затруднительна.

Несмотря на вышесказанное, установка ДЗ целесообразна, поскольку используемые в её отсутствие защиты не удовлетворяют высоким требованиям безопасности, предъявляемым к шахтному оборудованию. Например, максимальная токовая защита, установленная со стороны высшего напряжения (ВН) трансформатора, должна быть отстроена от его броска тока намагничивания (БТН). При отстройке по амплитуде защита имеет низкую чувствительность к витковым замыканиям (ВЗ), а при отстройке по времени затухания БТН – низкое быстродействие при коротких замыканиях (КЗ) в трансформаторе.

Для решения этой задачи существует возможность использовать уже установленные на подстанции пояса Роговского (ПР) и тем самым повысить безопасность и надежность работы трансформатора КТСП.

Катушки Роговского, как и традиционные трансформаторы тока (ТТ), используются для передачи информации о состоянии защищаемого объекта в устройства релейной защиты. Пояс Роговского представляет собой



**Рис. 1** Пояс Роговского

замкнутый соленоид с равномерной намоткой без ферромагнитного магнитопровода (рис. 1).

Принцип его действия основан на регистрации магнитного поля, создаваемого измеряемым током, и описывается уравнением:

$$\varepsilon(t) = \frac{d\psi(t)}{dt}, \quad (1)$$

где потокосцепление обмотки можно переписать как функцию от измеряемого тока.

Согласно выражению (1), имеем:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi(t)}{dt} &= w_2 S \frac{dB(t)}{dt} = w_2 S \frac{dB(t)}{dt} \cdot \frac{dH(t)}{dH(t)} = \\ &= w_2 S \mu_0 \frac{dH(t)}{dH(t)} = \frac{w_2 S \mu_0 w_1}{l} \frac{di_1(t)}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

В выражении (2) число витков первичной обмотки  $w_1$  равно единице, поэтому выражение (2) преобразуется к виду:

$$\varepsilon(t) = \frac{w_2 S \mu_0}{l} \frac{di_1(t)}{dt}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon(t)$  – ЭДС на зажимах пояса;  $w_2$  – количество витков в обмотке пояса;  $S$  – площадь поперечного сечения обмотки пояса;  $\mu_0$  – постоянная магнитной проницаемости вакуума;  $l$  – длина средней линии обмотки пояса.

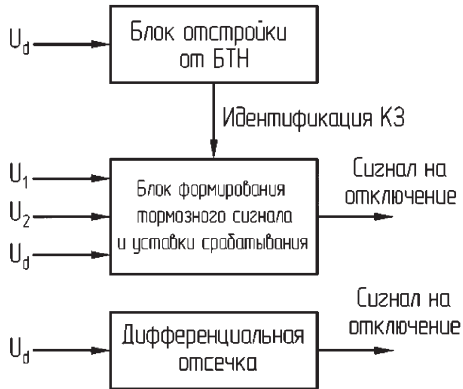
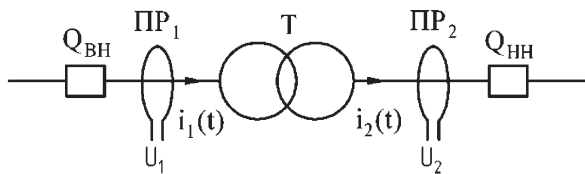
Из полученных выражений очевидно, что напряжение на зажимах ПР при отсутствии нагрузки является производной от измеряемого тока. Следует также отметить, что выходной сигнал ПР имеет малую мощность и недостаточен для работы электромеханических устройств. Его использование возможно только при наличии эффективных средств усиления и обработки сигналов. Такую возможность предоставляет использование микропроцессорной техники.

Выполненные лабораторные исследования работы поясов Роговского применительно к ДЗ трансформатора показали:

1. ПР в отличие от ТТ не имеет ферромагнитного сердечника, насыщение которого приводит к искажению вторичного сигнала. Благодаря этому ПР не вносит искажений во вторичный сигнал, что позволяет упростить алгоритмы функционирования дифференциальной защиты трансформатора.
2. Отсутствие насыщения позволяет повысить быстродействие защиты при внутренних КЗ, а также повысить чувствительность к витковым замыканиям в силовом трансформаторе в максимальных нагрузочных режимах.
3. Для исключения во вторичном сигнале высокочастотных составляющих и восстановления формы измеряемого сигнала целесообразно использовать ПР совместно с интегрирующими цепями. В том случае, если на выходе пояса Роговского не используется интегрирующая цепь, соответствующие операции должны быть предусмотрены в алгоритме защиты.

Учитывая вышеуказанные соображения, совместно с компанией «ЕХС» (Energy X Components) была разработана микропроцессорная ДЗ на поясах Роговского, структурная схема которой приведена на рис. 2.

Для испытания защиты была собрана установка, приведенная на рисунке 3. В качестве защищаемого трансфор-

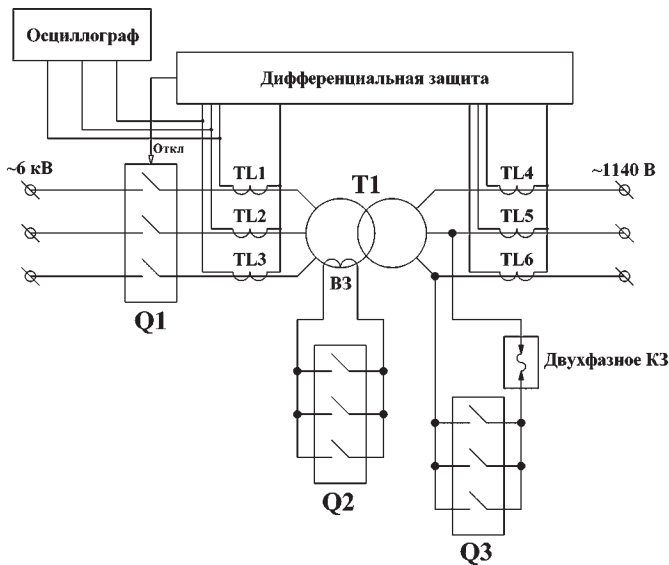


**Рис. 2 Структурная схема дифференциальной защиты на поясах Роговского**

матора выбран трансформатор  $T_1$  типа EX-TC-630-6/1,14, выпускаемый компанией «ЕХС».

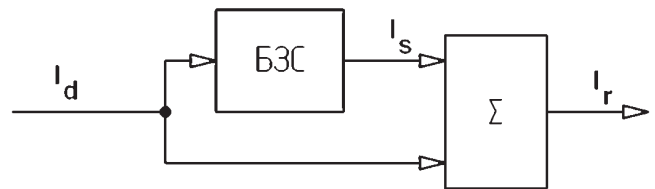
Для проверки работоспособности дифференциальной защиты проведены следующие опыты.

1. Включение на холостой ход. Поскольку в качестве первичных датчиков тока используются датчики с сердечником из немагнитного материала, которые не насыщаются при протекании первичных токов с апериодическими составляющими, то при внутреннем КЗ дифференциальный сигнал всегда остаётся синусоидальным, в то время как при БТН дифференциальный сигнал, кроме основной, содержит вто-



**Рис. 3 Схема испытаний:**

$T_1$  – защищаемый трансформатор;  $TL_1$ – $TL_3$  – пояса Роговского стороны высшего напряжения;  $TL_4$ – $TL_6$  – пояса Роговского стороны низшего напряжения;  $Q_1$  – выключатель EX-BB6-20/1000-2 стороны ВН;  $Q_2$  – выключатель EX-BB6-20/1000-2, имитирующий витковое замыкание;  $Q_3$  – выключатель EX-BB6-20/1000-2, имитирующий двухфазное дуговое замыкание



**Рис. 4 Схема получения тормозного сигнала для отстройки от БТН:**

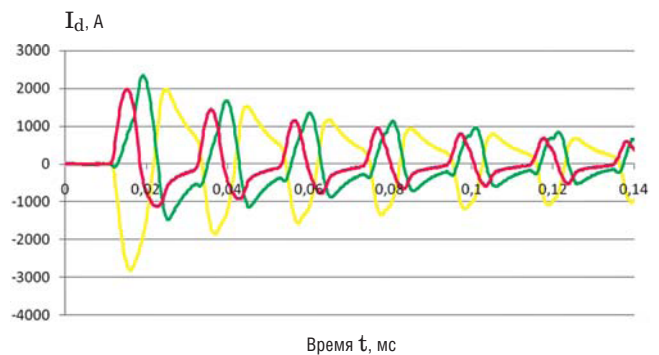
$I_d$  – входной дифференциальный сигнал;  $I_s$  – сдвинутый сигнал на 10 мс;  $I_r$  – тормозной сигнал для отстройки от БТН; БЗС – блок задержки сигнала;  $\Sigma$  – сумматор

рую гармонику и гармоники более высоких порядков. Аперриодическая составляющая тока КЗ значительно ослабляется такими датчиками и можно считать, что она полностью затухает за полпериода промышленной частоты.

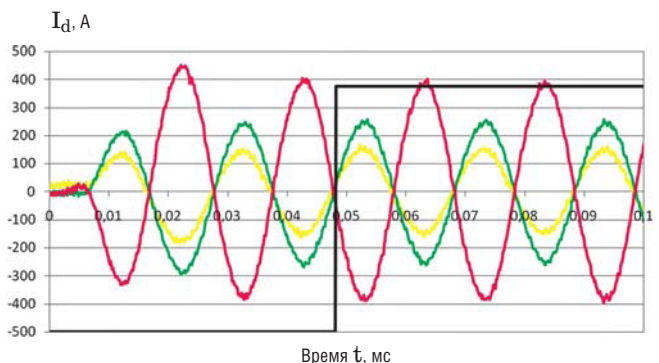
Возможности микропроцессорной элементной базы и достоинства ПР позволили реализовать для выделения гармонических составляющих звено-фильтр, обладающее постоянным временем задержки выходного сигнала на выходе в 10 мс (рис. 4). Такое исполнение блока отстройки исключает задержки срабатывания дифференциальной защиты при внутренних КЗ с большой апериодической составляющей, не снижая при этом уровень отстройки от БТН.

Полученные в результате опыта осциллограммы (рис. 5) показали, что дифференциальная защита действительно надёжно отстроена от бросков тока намагничивания.

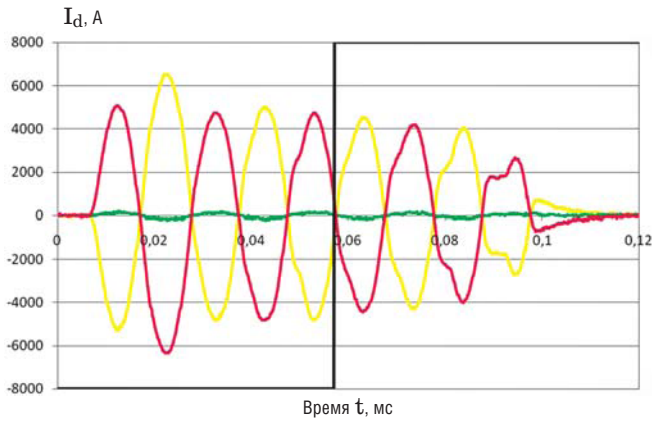
2. Опыт виткового замыкания. Внутренние КЗ возникают вследствие повреждения изоляции обмоток или отводов. Возможны замыкания на выводах трансформатора и КЗ в обмотках: между обмотками соседних фаз, на землю, катушечные и витковые замыкания. Авария может начинаться с любого



**Рис. 5 Осциллограмма дифференциальных токов при БТН (токи приведены к стороне низшего напряжения)**



**Рис. 6 Осциллограмма дифференциальных токов при ВЗ и сигнал защиты на отключение трансформатора (токи приведены к стороне низшего напряжения)**



**Рис. 7** Осциллограмма дифференциальных токов при двухфазном КЗ и сигнал защиты на отключение трансформатора (токи приведены к стороне низшего напряжения)

повреждения, но наиболее вероятным повреждением силового трансформатора внутри бака является витковое замыкание.

С целью оценки чувствительности защиты к ВЗ был намотан один виток на стержень магнитопровода трансформатора и произведено его замыкание (рис. 6). В этом опыте порог срабатывания защиты был выбран с тем условием, чтобы защита не срабатывала при токах внешнего КЗ.

Из полученной осциллограммы следует, что дифференциальная защита позволяет отключить витковое замыкание за время до 50 мс.

3. Опыт двухфазного КЗ через дугу. Для оценки быстродействия защиты при внутреннем КЗ был проведен опыт двух-

фазного замыкания, которое инициализировалось через тонкую проволоку (рис. 7). По результатам опыта при токе короткого замыкания, равном  $13 \cdot I_{2 \text{ ном}}$ , время срабатывания защиты не превышает 50 мс.

### Выводы

1. Дифференциальная защита с ПР надёжно отстроена от разнополярных и однополярных БТН по принципу торможения высшими гармоническими составляющими. Отключение внутренних КЗ с апериодической составляющей не сопровождается задержками в срабатывании, характерными для ДЗ, получающими входные сигналы от ТТ и использующими тот же принцип торможения;
2. Отсутствие насыщения датчиков исключает появление переходного тока небаланса.
3. Благодаря отсутствию ферромагнитного сердечника ПР обеспечивает линейное преобразование сигнала в широком диапазоне его значений, то есть появляется возможность построения алгоритмов, обеспечивающих высокую устойчивость быстроты срабатывания дифференциальной защиты.
4. Чувствительность защиты к ВЗ позволяет заблаговременно выводить трансформатор с замыканием одного витка в ремонт.
5. Проведенные на заводе компании «ЕХС» испытания подтвердили перспективность использования поясов Роговского в качестве датчиков для микропроцессорной дифференциальной защиты трансформаторов.