

# Влияние применения высокоточных трансформаторов тока и напряжения на выбор принципов работы и выбор уставок микропроцессорных устройств РЗ

Разработанные с использованием самых современных технологий трансформаторы тока оптические электронные находят все более широкое применение в энергетике. Эти трансформаторы тока обеспечивают высокую точность измерения первичных токов, что оказывает существенное влияние на параметры устройств РЗ. Настоящая статья посвящена рассмотрению вопросов влияния применения указанных трансформаторов тока на параметры срабатывания устройств РЗ.

## Авторы:

Балашов В.В.,  
Еремеев Д.Г.,  
Янин М.А.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Использование электронных измерительных трансформаторов тока, основанных на применении эффекта Фарадея, дает ряд преимуществ, которые могут быть использованы для целей защиты оборудования. Рассмотрим наиболее характерные преимущества таких трансформаторов тока на примере «Трансформаторов тока электронных оптических ТТЭО с цифровым выходом», выпускаемых АО «ПРОФОТЕК» (на данный момент – это единственные трансформаторы тока, работающие на таком принципе, внесенные в государственный реестр типов и средств измерений).

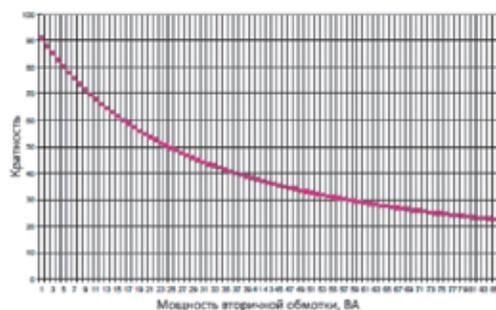


Рис. 1. Кривая 10 %-кратности трансформатора тока ТГФ-110 2000/5А 50ВА 5Р 35

## Независимость динамического диапазона и точности от вторичных цепей

Электромагнитные трансформаторы тока имеют существенную зависимость от тока предельной кратности от нагрузки вторичных цепей, характерная кривая приведена на рис. 1. В реальности помимо нагрузки конкретной вторичной обмотки ТТ на погрешность ТТ также влияет нагрузка всех остальных вторичных обмоток ТТ, что приводит к тому, что наиболее распространенный коэффициент предельной кратности ТТ редко превышает значения 20–35. Соответственно, значения токов предельной кратности практически никогда не достигают расчетных значений токов КЗ на шинах. Применение цифрового выхода в ТТЭО снимает данные ограничения, т.к. данные передаются в оцифрованном виде, и от топологии сети передачи данных и числа конечных потребителей информации точность измерений не зависит.

## Широкий диапазон измеряемых токов при отсутствии эффекта остаточной намагниченности

Диапазон измеряемых токов ТТЭО позволяет проводить измерение токов короткого замыкания вплоть до значений динамической стойкости без ограничений и искажения формы кривой тока, что позволяет реализовывать более эффективные ал-

горитмы защиты. ТТЭО из-за отсутствия остаточной намагниченности позволяют исключить из защит вероятностные алгоритмы оценки возможного состояния ТТ после КЗ, что должно повысить эффективность защит особенно при наличии АПВ. На рис. 2 приведена осциллограмма цифрового потока ТТЭО, снятая в процессе испытаний динамическими токами короткого замыкания.

### Высокая точность измерений во всем диапазоне измеряемых токов

При применении классических электромагнитных трансформаторов в верхней и нижней части диапазона измеряемых токов имеется существенная погрешность, которая может достигать значений 5–10 %. Данные погрешности учитываются в настройках защит и снижают их эффективность. Применение алгоритмов цифровой адаптивной обработки измеренного оптического сигнала ТТЭО позволяет существенно повысить линейность и точность измеряемых токов. В диапазоне рабочих токов во всем диапазоне рабочих температур погрешность ТТЭО не превышает 0,2 %, а в верхней части диапазона (зона токов КЗ на шинах) – не более 1–1,5 %. На рис. 3 приведен характерный график зависимости погрешности ТТЭО от измеряемого тока.

### Точность воспроизведения переходных процессов

При возникновении переходного процесса скорость изменения аperiodической составляющей гораздо меньше скорости изменения переменной составляющей, а периодическая составляющая плохо трансформируется во вторичную цепь, и большая ее часть идет на насыщение сердечника. Это, в свою очередь, ухудшает трансформацию периодической составляющей во вторичную цепь и также повышает долю этого тока в токе намагничивания. Возникает так называемое «подмагничивающее действие». Учитывая, что в сердечниках классических электромагнитных ТТ во многих случаях имеет место остаточная магнитная индукция, которая сохраняется в течение длительного времени (дни, недели и даже месяцы), может возникнуть ситуация, когда защита не отработает, что наиболее актуально для линий, работающих на перетоках или с большим запасом техноло-

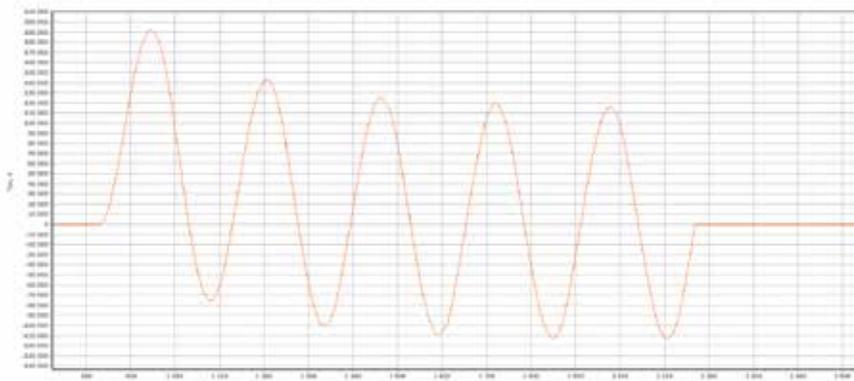


Рис. 2. Осциллограмма цифрового потока ТТЭО, снятая в процессе испытаний динамическими токами короткого замыкания

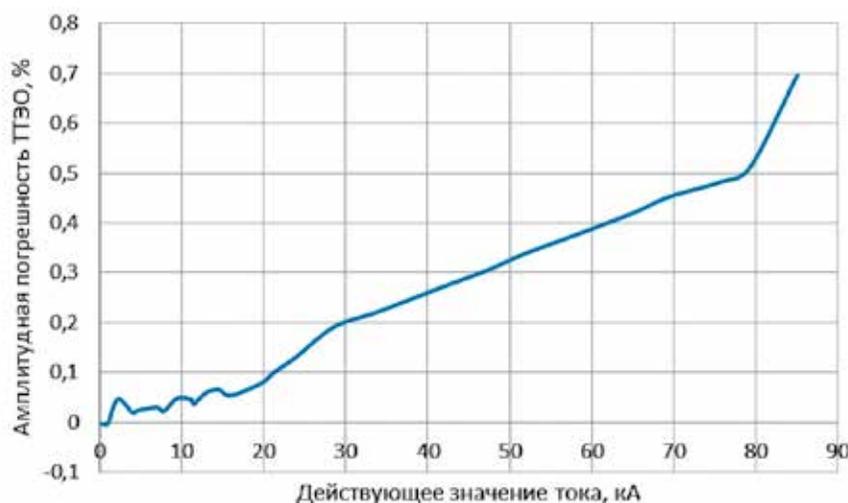


Рис. 3. Характерный график зависимости погрешности ТТЭО от измеряемого тока

гического резерва – т.к. реальный ток в линии существенно меньше номинального и размагничивание может проходить очень долго. Это особенно актуально для дифференциальных защит, т.к. вместе с токами намагничивания ТТ возрастают и токи небаланса в схеме защиты. В ТТЭО возврат к погрешности установившегося режима после отключения КЗ происходит за время 20–100 микросекунд. В момент непосредственного измерения переходного процесса мгновенная погрешность ТТЭО не превысит значение 1–2 % в случае измерения фронтов/спадов импульса длительностью более 17 микросекунд, что более чем достаточно для решения задач защиты основного оборудования в электроэнергетике. Фактически, ТТЭО соответствуют, в том числе, требованиям, предъявляемым к трансформаторам тока для переходных процессов класса ТРЕ.

### Частота измерений

Стандартная спецификация протокола МЭК 61850-9-2LE подразумевает применение данных измерений в терминалах защит, оцифрованных с частотой 4000 Гц (80 точек на период промышленной частоты). Реально в большинстве классических защит используется частота 1000–2000 Гц, выбор которой обусловлен инерционностью классических ТТ и рассчитанных для них алгоритмов. Возможность использования ТТЭО позволяет существенно расширить быстроедействие алгоритмов некоторых видов защит, так, в терминалах Siprotec 5 имеется возможность применения более эффективных алгоритмов, требующих оцифровки с частотой 16000 Гц. Решения, примененные при разработке ТТЭО, позволяют обеспечить такую потребность, и выдавать данные не только в «облеченной вер-

**Таблица 1.** Сравнительная таблица токов срабатывания ДЗШ при применении электромагнитных и оптических ТТ

Периодическая слагающая (при $t=0$ ) максимально возможного тока, кА	Ток срабатывания ДЗШ при погрешности ТТ равной 10 %, кА	Ток срабатывания ДЗШ при погрешности ТТ равной 0,5 %, кА	Ток срабатывания ДЗШ при погрешности ТТ равной 0,15 %, кА
20	3	0,15	0,045
40	6	0,3	0,09
60	9	0,45	0,135
80	12	0,6	0,18

сии» МЭК 61850-9-2LE, но и в том числе в протоколе МЭК 61850-9-2 с частотой выборок до 64 000 Гц. При этом все измерения, производимые на данной частоте и выдаваемые в поток, обеспечивают заявленный класс точности трансформатора.

### ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА ПАРАМЕТРЫ СРАБАТЫВАНИЯ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Как следует из вышеизложенного, ТТЭО – это высокоточный измерительный прибор с малой погрешностью в полном диапазоне измеряемых величин. Например, ТТЭО имеет зависимость погрешности от величины измеряемого тока, приведенную на рис. 3. Поскольку информация о токах от ТТЭО передается в цифровом виде, то можно принимать погрешность ТТЭО, не зависящей от подключенной к нему нагрузки.

Рассмотрим влияние погрешности ТТЭО на выполнение устройств РЗиА. Очевидно, что ТТЭО влияют на все устройства РЗиА, в которых используется информация о токах, напряжениях и одновременно о токах и напряжениях.

Рассмотрим выбор уставок по току срабатывания реагирующих органов дифференциальных защит шин (ДЗШ) и дифференциальных защит ошинок (ДЗО) для реле без торможения типа РНТ565 с насыщающимся трансформатором. Ток срабатывания реагирующих органов ДЗШ выбирается по выражению (1):

$$I_{с.з.} \geq K_n \cdot K_{апер.} \cdot f_i \cdot I_{к.з. макс} \quad (1)$$

где:  $K_n$  – коэффициент надежности, учитывающий ошибку реле и необходимый запас, может быть принят равным 1,5;

$K_{апер.}$  – коэффициент, учитывающий переходной процесс (наличие апериодической составляющей тока); при использовании реле с насыщающимися трансформаторами может быть принят равным 1,0;

$f_i$  – относительная погрешность трансформатора тока; принимается равной 0,1,

поскольку трансформаторы тока выбираются по кривым допустимых кратностей при 10% погрешности;

$I_{к.з. макс}$  – периодическая слагающая (при  $t=0$ ) максимально возможного периодического тока короткого замыкания, проходящего при внешнем повреждении по трансформаторам тока элемента, являющегося расчетным.

При выборе уставок принимается, что с погрешностью 10 % работает трансформатор тока (ТТ), через который проходит полный ток КЗ, а остальные ТТ в схеме ДЗШ работают без погрешности или что то же самое с погрешностью равной 0 %. Считаем допустимым при применении ОЭТТ принимать  $K_{апер.}$  равным 1 при условии, что в реагирующем органе ДЗШ приняты меры по исключению учета апериодической составляющей из периодического тока КЗ.  $K_n$  оставим равным 1,5, поскольку он не зависит от типа, используемых в ДЗШ, трансформаторов тока. Если заменить в выражении (1) погрешность ТТ равную 10 % на погрешность ТТ равную 0,5 % или 0,15 %, то получаются данные, приведенные в таблице 1.

Из таблицы следует, что при снижении погрешности ТТ с 10 % до 0,5 %, т.е. в 20 раз, ток срабатывания ДЗШ также снижается в 20 раз. Такое снижение тока срабатывания ДЗШ позволяет:

- повысить чувствительность ДЗШ;
- увеличить быстродействие ДЗШ за счет уменьшения времени срабатывания реагирующих органов ДЗШ;
- отказаться от использования торможения в измерительных органах ДЗШ для увеличения ее чувствительности;
- повысить чувствительность (надежность срабатывания) ДЗШ за счет отказа от применения тормозного принципа реагирующих органов ДЗШ;
- упростить схему ДЗШ за счет отказа от чувствительных комплектов ДЗШ и защит, вводимых в работу при опробовании;
- упростить алгоритм работы измерительных органов ДЗШ за счет от-

сутствия в цепях измерительных органах ДЗШ нелинейных ферромагнитных элементов.

Отсутствие в ОЭТТ магнитной системы с использованием магнитных материалов приводит к:

- отсутствию необходимости проведения проверок допустимости нагрузок на ТТ при росте токов КЗ. В традиционных ТТ с магнитным сердечником указанная проверка необходима из-за того, что чем больше первичный ток КЗ, тем меньше допустимая вторичная нагрузка на ТТ. Постоянный рост токов КЗ приводит к постоянной необходимости выполнения таких проверок, что является достаточно трудозатратной процедурой. В ТТЭО отсутствует магнитная система, и выполнение такой проверки для ТТЭО сводится к проверке не превышения максимального тока КЗ допустимого предельного тока ТТЭО;

- передача информации от ТТЭО к устройству РЗ в цифровой форме приводит к отсутствию в устройстве РЗ входных трансформаторов тока и, как следствие, к отсутствию искажения вторичного тока за счет насыщения входных трансформаторов тока устройства РЗ. Это в свою очередь упрощает алгоритмы функционирования устройств РЗ, повышает надежность их работы и уменьшает собственное время срабатывания устройств РЗ.

Важной особенностью использования ТТЭО является возможность при их применении отказа от тормозного принципа выполнения реагирующих органов ДЗШ. Наличие торможения в реагирующих органах ДЗШ приводит к их существенному загромождению и к возможности их отказа в режимах малого тока КЗ и большого тормозного тока (больших внешних транзитных нагрузок).

Низкий ток срабатывания реагирующих органов ДЗШ при применении ТТЭО позволяет отказаться от решений по повышению чувствительности реагирующих органов ДЗШ в режимах отключения части присоединений и в режимах опробования напряжением шин от одного присоединения (линии, АТ и т.п.).

Очевидно, что все перечисленные положительные возможности можно реализовать только при применении в ДЗШ на всех присоединениях ТТЭО. Все вышеизложенное можно отнести и к ДЗО.

Все вышеизложенные соображения относительно ДЗШ можно отнести и к диф-

ференциальным защитах линий, использующим тормозной принцип.

Применение высокоточных ТН также имеет свои преимущества. За счет повышения точности ТН возможно:

- увеличение зоны охвата первых ступеней дистанционных защит линий с 0,85 от длины линии до 0,9 и даже несколько больше;
- повышение чувствительности дистанционных защит за счет уменьшения величин коэффициентов согласования при выборе их уставок;
- повышение точности определения места КЗ приборами для определения места КЗ при дистанционном способе определения места КЗ.

Очевидно, что наибольший выигрыш для выбора уставок РЗ достигается при совместном применении высокоточных ТТ и ТН.

В ДЗТ (ДЗАТ) применение со всех сторон защищаемого оборудования ОЭТТ не позволяет существенно снизить ток срабатывания защиты. Ток срабатывания ДЗТ (ДЗАТ) при отсутствии торможения определяется по следующей формуле (2):

$$I_{с.з.} \geq K_n \cdot I_{нб. расч.} \quad (2)$$

где:  $K_n$  – коэффициент, учитывающий ошибку реле и защит, может быть принят равным 1,3.

$$I_{нб. расч} \geq I'_{нб. расч.} + I''_{нб. расч.} + I'''_{нб. расч.}$$

где:  $I'_{нб. расч.}$  – составляющая, обусловленная погрешностью трансформатора тока, принимается равной 0,1;

$I''_{нб. расч.}$  – составляющая, обусловленная регулированием напряжения защищаемого трансформатора (автотрансформатора).

Принимается равной в относительных единицах половине диапазона регулирования трансформатора (автотрансформатора), например, 0,16;

$I'''_{нб. расч.}$  – составляющая, обусловленная неточностью установки на насыщающемся трансформаторе реле расчетных чисел витков для неосновных обмоток. Для микропроцессорных защит составляющая принимается равной нулю.

Применение ТТЭО позволяет в формуле (2) существенно снизить первую составляющую небаланса ( $I'_{нб. расч.}$ ) и исключить третью составляющую небаланса ( $I'''_{нб. расч.}$ ) и не влияет на вторую составляющую тока небаланса ( $I''_{нб. расч.}$ ), поскольку изменение параме-

тров защищаемого оборудования (регулирование) на Т, АТ не зависит от типа используемых в устройстве РЗ трансформаторов тока.

Применение ТТЭО для выполнения функций РЗ генераторов, двигателей позволяет отказаться от торможения при выполнении их дифференциальных защит и существенно снизить токи срабатывания устройств РЗ, что важно для выявления КЗ на ранней стадии его развития и уменьшения объемов повреждения оборудования. Для генераторов и двигателей это возможно, поскольку отсутствует возможность изменения их параметров (регулировка) в процессе работы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 3. Защита шин 6–220 кВ станций и подстанций. Госэнергоиздат, М.-Л., 1961 г.
2. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 4. Защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов. Госэнергоиздат, М.-Л., 1962 г.
3. Правила устройства электроустановок, шестое издание, дополненное с изменениями. М., Госэнергоиздат, 2000 г.

АО «ПРОФОТЕК» – отечественное предприятие полного цикла в области производства оптического волокна и волоконно-оптических приборов.

Деятельность компании осуществляет коллектив высокопрофессиональных сотрудников, включая ученых с мировым именем.

«ПРОФОТЕК» – единственный в России обладатель патента на технологию производства уникального чувствительного волокна.

Компания создана при участии АО «РОСНАНО».

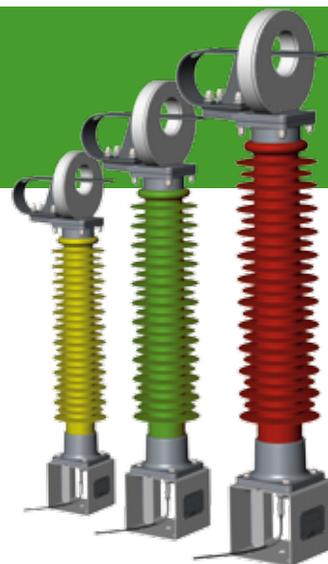


## Трансформаторы тока электронные оптические (ТТЭО)

### Преимущества применения:

- точность
- безопасность
- интеллектуальность
- экономичность

ТТЭО внесены в Государственный реестр средств измерений.



109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5, Технополис «Москва»

+7 (495) 775-83-39

www.profotech.ru

info@profotech.ru