

Компания АО «Профотек» и редакция журнала «Энергоэксперт» выражают благодарность персоналу ПАО «Федеральная Сетевая Компания Единой Энергетической Системы» и АО «Системный Оператор Единой Энергетической Системы» за помощь, оказанную в подготовке и написании статьи. Публикуемая электронная версия расширена и исправлена в соответствии с полученными комментариями и рекомендациями специалистов ФСК и СО.

ТЕКУЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ТТ И ТН 500 кВ

ЯНИН М.А., технический директор АО «Профотек»

ШЕМЕТОВ А.С., заместитель начальника департамента релейной защиты, метрологии и автоматизированных систем управления технологическими процессами ПАО «ФСК ЕЭС»

КОЗЫРЕВ А.В., заместитель начальника СРЗА АО «СО ЕЭС»

КАНАФЕЕВ Р.И., начальник отдела испытаний АО «Профотек»

ИВАНОВ Н.А., техник отдела испытаний АО «Профотек»

Цифровые технологии быстрыми темпами начинают проникать в электроэнергетический сектор и наглядно демонстрируют огромный спектр преимуществ и возможностей, которые становятся доступными для трансформации отрасли и ее необратимого перехода на совершенно новый этап развития. Практический опыт, который мы получаем из внедрения и эксплуатации цифровых технологий на энергетических объектах, крайне ценен, потому что он позволяет выявить особенности современных систем и выработать принципиально новые подходы к их проектированию и управлению. Так, в России одним из самых крупномасштабных проектов по комплексной реализации передовых цифровых технологий на энергообъектах высокого класса напряжения стал проект – цифровая подстанция 500 кВ Тобол, который был реализован ПАО «ФСК ЕЭС».

ПС 500 кВ Тобол — питающий центр в Тюменской области, который решением ПАО «ФСК ЕЭС» стал технологическим полигоном для тестирования

новых устройств и измерительных систем в электроэнергетике.

В целях апробации инновационных решений по построению цифровых

подстанций на ПС 500 кВ Тобол была реализована информационная подсистема, функционирующая в соответствии с протоколом МЭК 61850 [1]. Данная подсистема была оснащена современными средствами измерений и защиты преимущественно отечественного производства. Основными целями реализации подсистемы явились:

- анализ и оценка оборудования различных производителей на предмет их совместной работы по протоколу МЭК 61850-9-2;
- получения практического опыта эксплуатации цифровых информационных систем для выработки единых подходов и требований к проектированию цифровых подстанций в электросетевом комплексе.

Одним из основных примененных решений явилось использование измерительных трансформаторов нового



Рис. 1. ОРУ ПС 500 кВ Тобол

типа для выполнения измерений электрического тока и напряжения. Для измерения электрического тока ВЛ 500 кВ Тобол – ЗапСиб I цепь и ВЛ 500 кВ Тобол – ЗапСиб II цепь были установлены трансформаторы тока электронные оптические (ТТЭО) с классом точности 5PFE для нужд РЗА и 0,2s для АИИС КУЭ. Для измерения напряжения были установлены делители напряжения емкостные электронные (ДНЕЭ) с совмещенном классом точности 3P для нужд РЗА и 0,2 для АИИС КУЭ.

С целью анализа работы находящихся в опытной эксплуатации измерительных трансформаторов тока и напряжения, а также подключенных к ним устройств РЗА, на ПС 500 кВ Тобол совместным решением ПАО «ФСК ЕЭС» и АО «СО ЕЭС» была создана и продолжает работать в настоящее время рабочая группа (далее – Рабочая группа) в состав которой вошли представители эксплуатации (ФСК ЕЭС), Системного оператора, производителя трансформаторов (АО «Профотек»), производителей используемых в проекте терминалов релейной защиты.

Рабочей группой проводится регулярный анализ функционирования оборудования и устройств как в нормальных режимах, так и в режимах возмущений в энергосистеме, были подготовлены и проведены ряд натурных испытаний.

АНАЛИЗ ПОСТАНОВКИ АТ-2 ПОД НАПРЯЖЕНИЕ

Для оценки работоспособности информационной подсистемы в целом, а также для сравнения рабочих характеристик измерительных трансформаторов при броске намагничивающего тока (БНТ) ПАО «ФСК ЕЭС» был проведен опыт постановки АТ-2 номинальной мощностью 250 МВА под напряжение. На рис 2 представлена упрощенная электрическая схема, которая отображает связь между ПС 500 кВ Тобол и ПС 500 кВ ЗапСиб по ВЛ 500 кВ Тобол – ЗапСиб II цепь.

Как известно, постановка силового Т (АТ) под напряжение сопровождается резким скачком тока, который носит название броска намагничивающего тока (БНТ). При подаче напряжения на Т (АТ) из-за остаточной намагниченности в сердечнике происходит суммирование вновь возникающей магнитной индукции с магнитной индукцией, вызванной остаточной намагниченностью магнитопровода. Стоит отметить, что намагни-

чивание Т (АТ) из-за включения его под напряжение считается самым неблагоприятным случаем, вызывающим БНТ наибольшей амплитуды. При этом надо иметь ввиду, что БНТ раз от раза может отличаться на одном и том же Т (АТ), так как большое влияние на характер процесса оказывает значение вектора и величина напряжения, подаваемого на обмотку Т (АТ) при включении коммутационного аппарата [2].

По своей природе, различают однополярный и двухполярный БНТ [2]. Двухполярному БНТ характерна кривая тока с искаженной формой по обе стороны от оси времени. В то время как, однополярному БНТ характерна кривая тока, которая полностью смещена только в одну из сторон относительно оси времени. Такое смещение объясняется тем фактором, что БНТ содержит большую аperiodическую составляющую и как результат доминирующую вторую гармонику.

В данном режиме электромагнитные ТТ насыщаются из-за большой и длительно затухающей аperiodической составляющей БНТ, это сопровождается

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА

Ведущий рубрики



Балашов Виталий Васильевич

Директор по развитию ОАО «ВНИИР»

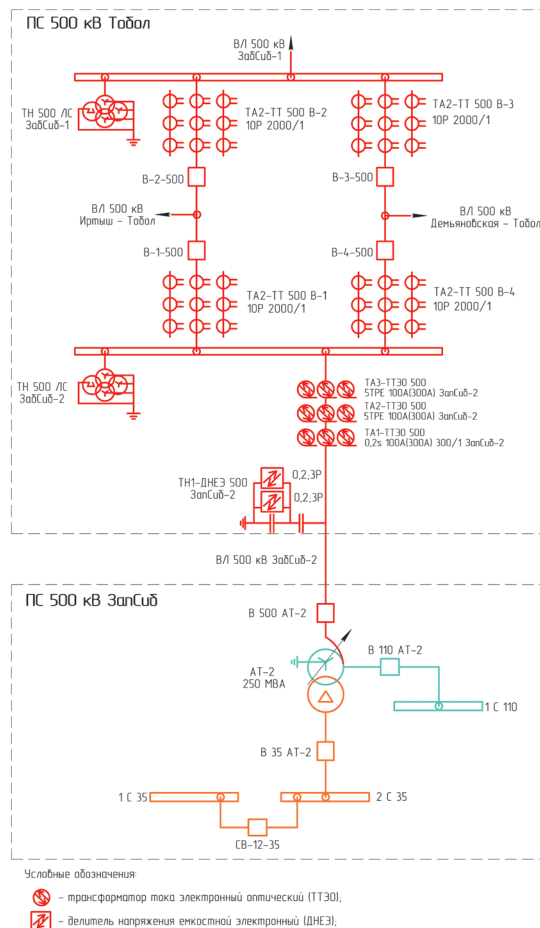


Рис. 2. Упрощенная электрическая схема связи ПС 500 кВ Тобол и ПС 500 кВ ЗапСиб

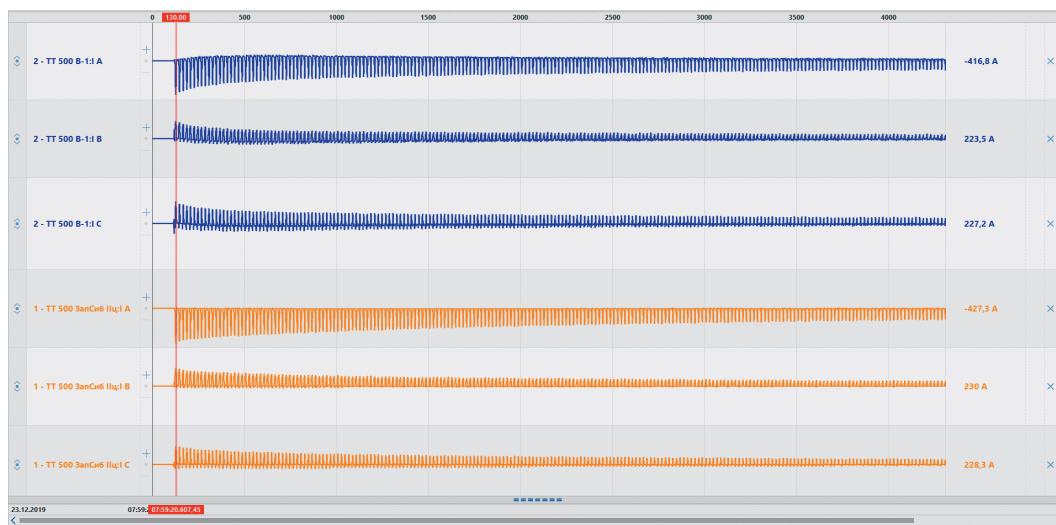


Рис. 3. Осциллограммы БНТ с электромагнитных ТТ (синий цвет) и оптических (желтый цвет) ТТ

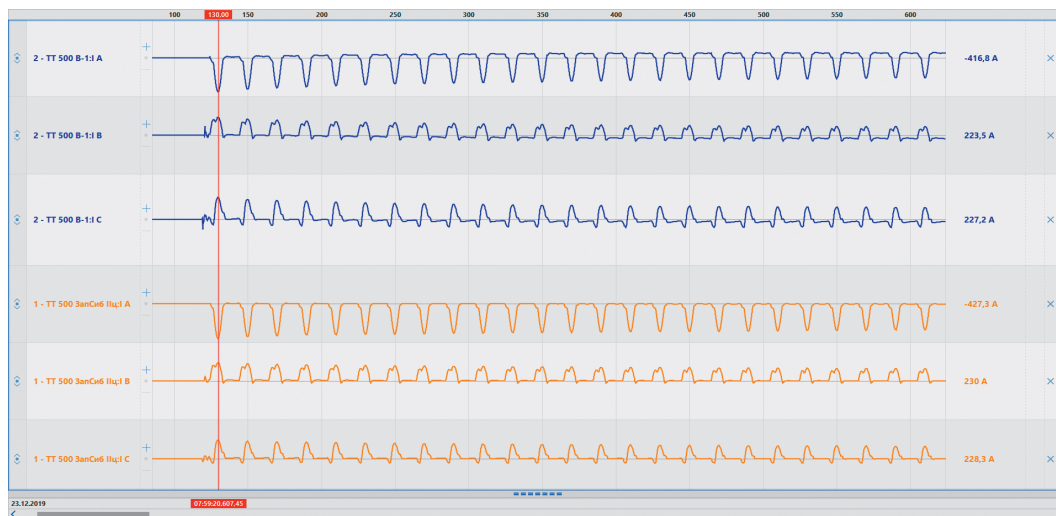


Рис. 4. Увеличенный масштаб БНТ по трем фазам с электромагнитных ТТ (синий цвет) и оптических (желтый цвет) ТТ

существенным снижением доли второй гармоники во вторичном токе [1].

Оптические ТТ не подвержены эффекту намагничивания так как их принцип работы исключает наличие магнитопровода. Таким образом, с теоретической точки зрения можно предположить, что показания оптических ТТ при БНТ будут иметь другой характер. Чтобы доказать это утверждение, в рамках работы Рабочей группы ПС 500 кВ Тобол было принято решение провести опыт постановки АТ-2 250 МВА, установленного на ПС 500 кВ ЗапСиб, под напряжение.

Осциллограммы, которые представлены в анализе, были записаны регистратором аварийных событий (РАС), который позволяет регистрировать аналоговые и цифровые значения одновременно. При этом РАС подключен на сумму токов по двум плечам (В-1 и В-4) для получения значений аналогового тока на ВЛ 500 кВ Тобол – ЗапСиб II цепь (см. рис. 2).

На рис. 3 представлены осциллограммы БНТ зафиксированного на ВЛ 500 кВ Тобол – ЗапСиб II цепь. Синим цветом изображены сигналы от электромагнитных измерительных ТТ; желтым цветом сигналы, зафиксированные оптическими измерительными ТТ. Общая форма кривых является характерными для БНТ. Продолжительность БНТ составляет более 5 с.

По рис. 4 можно судить, что форма тока фаза А совпадает по форме с формой однофазного БНТ, а форма тока по фазе В и фазе С имеют искаженную форму. Таким образом на фазах В и С наблюдается двухполярный БНТ.

В таблице 1 представлены пиковые значения БНТ для двух видов ТТ.

В связи с большой и длительно затухающей апериодической составляющей при БНТ характерно насыщение электромагнитных ТТ, даже если амплитуда самого тока относительно невелика. Как

было упомянуто ранее, когда электромагнитный ТТ насыщается, то происходит искажение формы вторичного тока.

На рис. 5 можно наблюдать разницу в зафиксированных измерениях. Из рис. 5 видно, что со временем происходит насыщение электромагнитных ТТ и затем плавное снижение эффекта намагничивания.

При увеличении масштаба можно наглядно наблюдать как с насыщением электромагнитного ТТ происходит искажение кривой тока, которая начинает смещаться вверх относительно оси времени. Смещение кривой относительно оси времени приводит к тому, что пиковое значение аналогового тока сни-

Таблица 1. Пиковые значения БНТ для двух видов ТТ

Фаза	Электромагнитный ТТ, А	Оптический ТТ, А
Фаза А	417	427
Фаза В	223	230
Фаза С	227	228

Рис. 5. Насыщение электромагнитных ТТ (синий цвет) при сравнении с оптическими ТТ (желтый цвет)

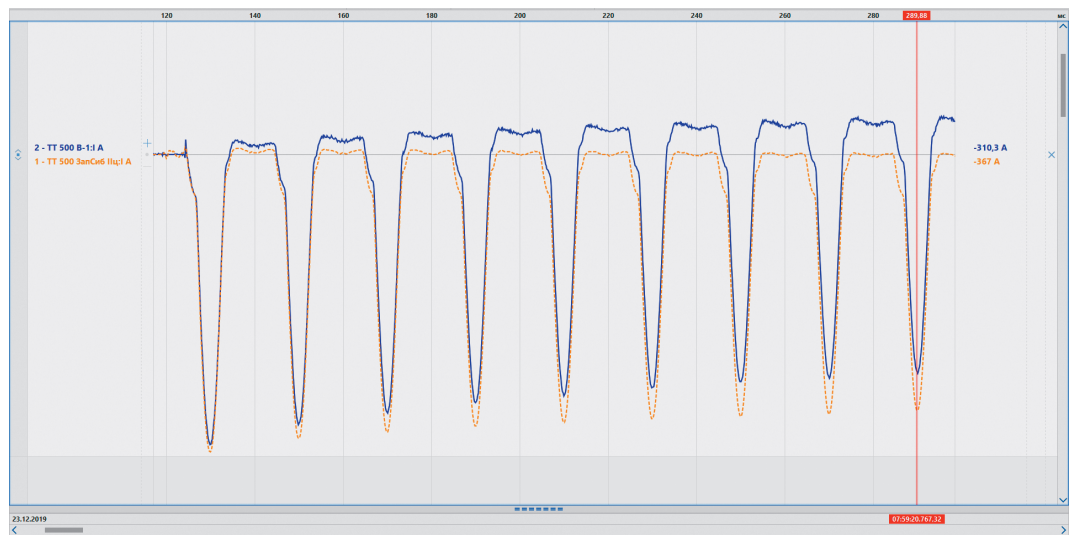


Рис. 6. Смещение кривой тока на электромагнитных ТТ (синий цвет) относительно кривой тока с оптических ТТ (желтый цвет)

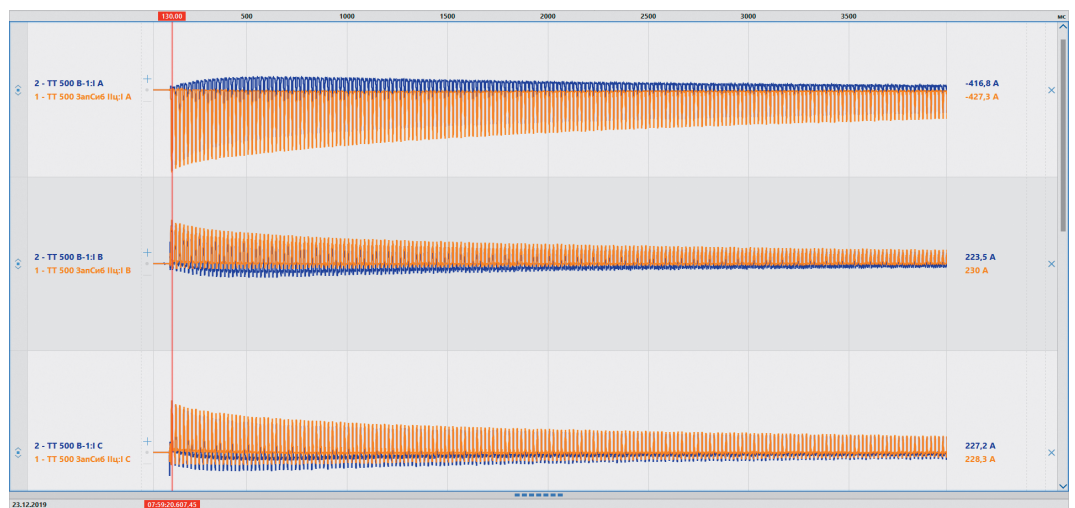
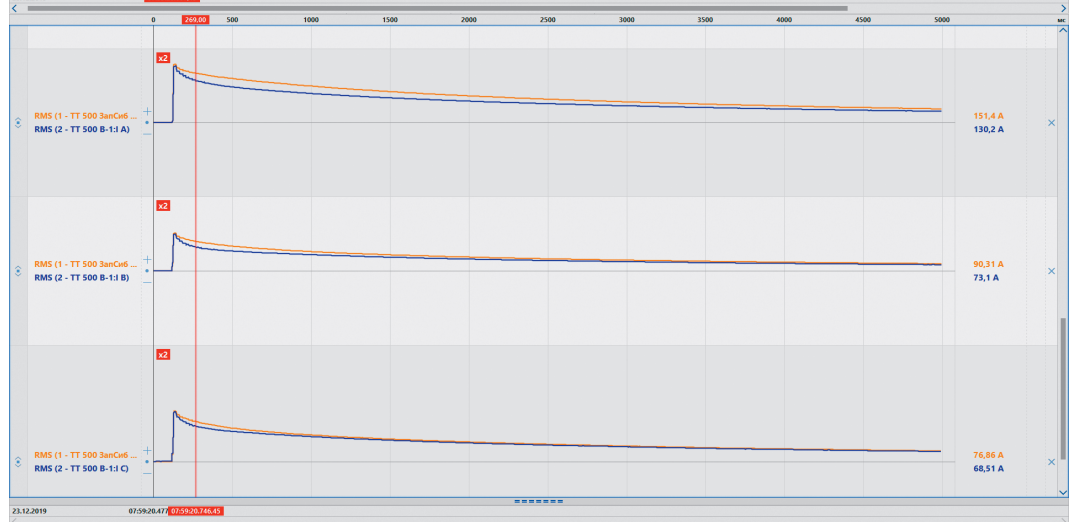


Рис. 7. Разница действующего значения БНТ для с электромагнитных ТТ (синий цвет) и оптических (желтый цвет) ТТ



жается. Например, в момент времени, который обозначен красной вертикальной кривой, значение тока для электромагнитного ТТ соответствует по модулю 310,3 А. Оптический ТТ в этот же момент времени регистрирует по модулю 367 А.

Как следствие, смещению кривой БНТ относительно нуля, зафиксированной электромагнитными ТТ, приводит к снижению действующего значения тока (RMS). На рис. 7 изображена характеристика действующего значения тока по трем фазам.

Анализ гармонического состава сигналов показал, что электромагнитные ТТ и оптические ТТ имеют одинаковую долю второй гармоники (100 Гц) на протяжении всего БНТ. Существенную разницу составляет доля постоянной составля-

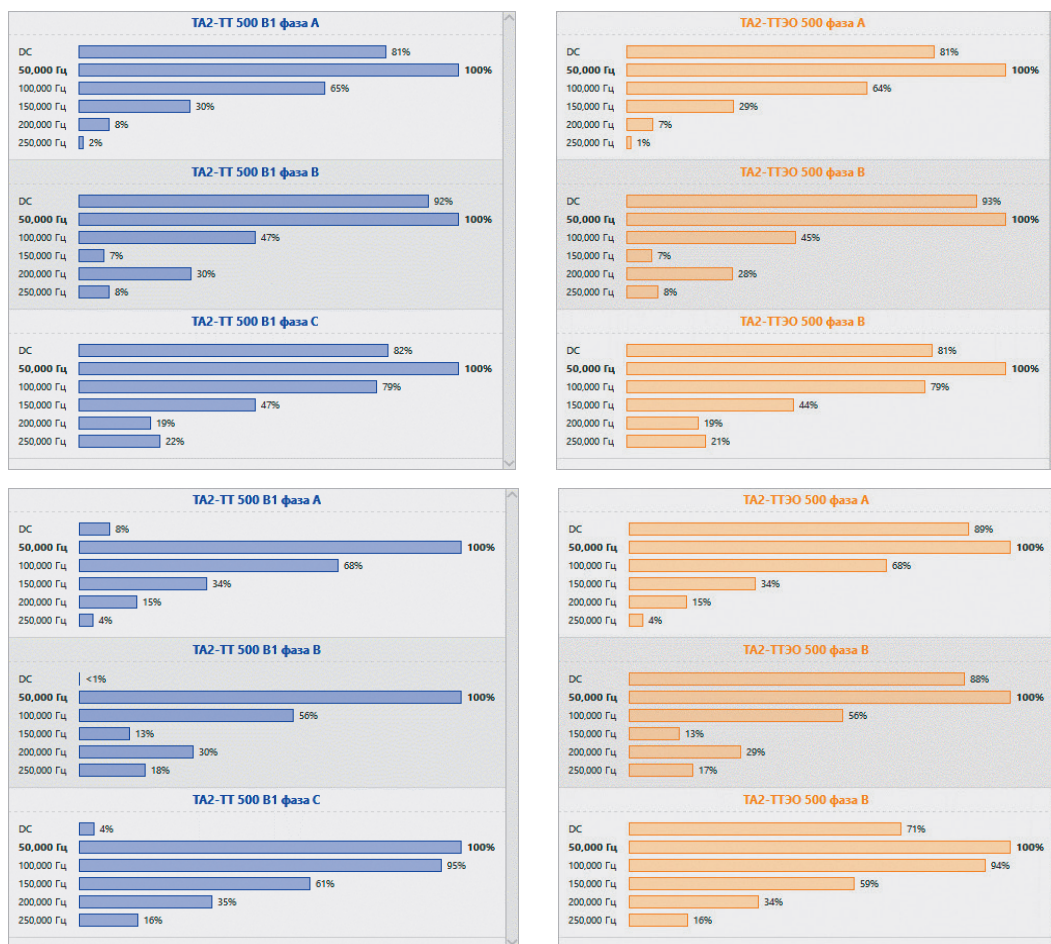


Рис. 8 Гармонический состав электромагнитных ТТ (синий цвет) и оптических ТТ (желтый цвет) в момент времени равном 10 мс.

Рис. 9 Гармонический состав электромагнитных ТТ (синий цвет) и оптических ТТ (желтый цвет) в момент времени равном 400 мс

ющей (DC-составляющей) в сигнале с данных устройств. В начальный момент времени DC-составляющая имеет одинаковую долю для двух типов ТТ. На рис. 8 представлен гармонический состав для момента времени равного 10 мс после подачи напряжения на АТ-2. Однако, доля DC-составляющей электромагнитного ТТ значительно уменьшается со временем. Так, после 400 мс она составляет для электромагнитного ТТ менее 10 % по всем трем фазам. В то время как для оптического ТТ изменение доли DC составляющей носит иной характер, а именно для фазы А возрастает с 81% до 89%; для фазы В уменьшается с 93 % до 88%; для фазы С уменьшается с 81% до 71%. На рис. 9 изображен гармонический состав электромагнитных ТТ и оптических ТТ в момент времени равном 400 мс.

Сравнительный анализ работы электромагнитных и оптических ТТ при БНТ при постановке АТ-2 номинальной мощностью 250 МВА под напряжение показал преимущества оптических ТТ, обусловленные отсутствием в оптическом ТТ явления намагничивания, что позво-

ляет, в свою очередь, получить более достоверные данные о состоянии работы сети без лишних искажений. Уровень передачи DC-составляющей для оптических ТТ выше по сравнению с электромагнитными ТТ. При этом в электромагнитных ТТ наблюдается снижение пикового значения, а также уменьшение действующего значения тока (RMS). DC-составляющая с электромагнитного ТТ со временем затухает, искажая тем самым представление терминалов РЗА о переходном процессе в системе.

ТЕКУЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ РАБОЧЕЙ ГРУППЫ

В результате работы Рабочей группы на ПС Тобол создан прототип построения информационной подсистемы, включающей в себя комплекс устройств РЗ и СА, РАС, электронных ТТ и ТН, коммутаторов, а также их настройки и программное обеспечение.

В процессе мониторинга функционирования информационного обмена между устройствами РЗА и электронными ТТ, ТН Рабочей группой:

- выявлены случаи периодического пропадания и искажения измерений от электронных ТТ и ТН (рис. 10, 11), что вызвало необходимость внесения изменений в прикладное программное обеспечение электронных блоков ТТЭО и ДНЕЭ и было устранено в процессе опытной эксплуатации;
- установлено наличие фазового сдвига между аналоговыми и цифровыми сигналами от ТТ и ТН, зафиксированными устройствами РЗА, производящими одновременную запись аналоговых и цифровых сигналов (рис. 12, 13), что вызвало необходимость внесения изменений в существующую и планируемую к выпуску нормативную базу в части уточнения требований к синхронизации времени микропроцессорных устройств РЗА и к регистрации аварийных событий в микропроцессорных устройствах РЗА, введенных СТО 56947007-29.120.70.241-2017 «Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА».
- выявлены случаи внесения дополнительных искажений в гармонический состав измеренных токов и напряже-

ний при применении устройств сопряжения с шиной процесса (рис. 14), что вызвало необходимость дополнительного исследования погрешностей измерения каналами с УСШ.

В настоящий момент Рабочая группа продолжает свою работу по мониторингу и анализу функционирования электронных ТТ и ТН. В ближайшей перспективе предстоит проконтролировать устранение выявленных недостатков функционирования в части искажения измерений и устранения фазового сдвига, а также выполнить ряд опытов, в том числе опыт короткого замыкания на ВЛ 500 кВ Тобол – ЗапСиб II цепь.

ВЫВОДЫ

На основании представленного анализа можно сделать нижеследующие выводы.

1. Необходимо продолжение работ по опытной эксплуатации и исследованию работы оптических ТТ и электронных ТН, цифровых терминалов РЗА и РАС, систем синхронизации времени в различных режимах, проведение которой позволит уверенно говорить о готовности к промышленному применению электронных ТТ и ТН.

Принятие решения о готовности промышленного применения электронных ТТ и ТН (без дублирования функций РЗА и функций РЗА ЛЭП (оборудования) от индуктивных и емкостных ТТ и ТН) возможно только при условии их стабильной и надежной работы.

Для принятия такого решения необходимо наличие положительного опыта эксплуатации электронных ТТ и ТН в различных режимах функционирования, для чего необходима дополнительная реализация пилотных проектов на других электросетевых объектах.

2. Полученный опыт эксплуатации и результаты исследований должны лечь в основу разработки новых алгоритмов функционирования устройств РЗА, направленных на улучшение их качественных характеристик.

3. Создание цифрового полигона на ПС 500 кВ Тобол позволило получить опыт эксплуатации передовых, инновационных технологий в условиях, приближенных к реальным, который будет своевременно учтен в требованиях СТО ПАО «ФСК ЕЭС».

ЛИТЕРАТУРА

1. Техноробочий проект «Информационная подсистема ЦПС ЕНЭС ПС 500кВ Тобол» 5000999-442307-01-001-ЦПС.

2. B. Kaszenny and A. Kulidjian, “An improved transformer inrush restraint algorithm,” Comput. Appl. Power, IEEE, 1998.

3. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов. – Репр.воспр.изд.1992 г. – М.: Издательский дом МЭИ, 2018. – 528 с.: ил.

Рис. 10. Характер искажения измерений тока от ТТЭ0



Рис. 11. Характер искажения измерения напряжения от ДНЭЭ



Рис. 12. Фазовый сдвиг между сигналами тока от ТТЭ0 (пунктирные линии) и аналоговым ТТ (сплошная линия)

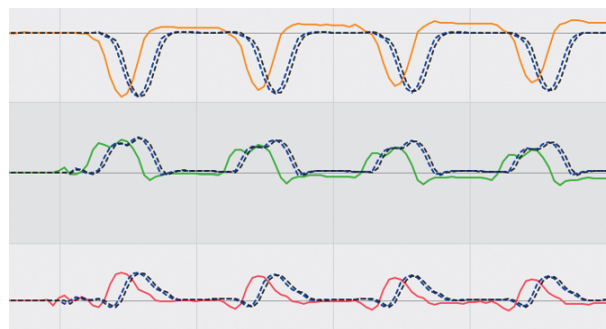


Рис. 13. Фазовый сдвиг между сигналами тока от ДНЭЭ (пунктирная линия) и аналоговым ТН (сплошная линия)

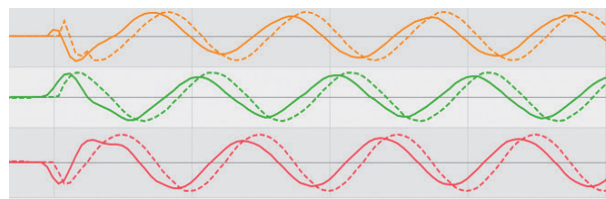


Рис. 14. Дополнительные искажения формы сигнала, вносимые устройствами сопряжения с шиной процесса (зеленая линия)

