

Сравнение работы цифровых и аналоговых ТТ и ТН при опытах однофазного КЗ на ЦПС 500 кВ ТОБОЛ

Представленная ПАО «Россети» Цифровая трансформация 2030 определяет перспективные направления развития электроэнергетического сектора. Одно из них – переход к цифровым подстанциям (ЦПС) [1]. В рамках реализации данного направления ПАО «ФСК ЕЭС» был реализован проект цифровая подстанция 500 кВ Тобол. В рамках проекта была протестирована работа устройств релейной защиты ООО «НПП «ЭКРА» (ступенчатые защиты типа ШЭ2710 521), ООО «Релематика» (ступенчатые защиты типа ТОР 300 КСЗ 813), ООО «Сименс» (ступенчатые защиты типа Siprotec-5) и измерительных трансформаторов тока и напряжения с цифровым интерфейсом МЭК 61850-9-2. В качестве измерительных ТТ и ТН, на ПС 500 кВ Тобол установлены трансформаторы тока электронно-оптические (ТТЭО) и делители напряжения электронно-емкостные (ДНЕЭ) производства АО «Профотек» (рис. 1 и 2).

Авторы:

Янин М.А.,
Канафеев Р.И.,
Иванов Н.А.,
Шеметов А.С.,
Козырев А.В.,
Антипин В.С.

Концепция ЦПС на базе электрической подстанции 500 кВ Тобол реализована через собственную цифровую информационную подсистему на двух отходящих воздушных линиях, которая работает в параллельном режиме с традиционной системой. Архитектура локальной вычислительной сети цифровой информационной подсистемы разделена на шину процесса и шину станции в соответствии со стандартом МЭК 61850. Цифровой интерфейс ТТЭО и ДНЕЭ реализует передачу вторичных сигналов в виде Sampled Values (SV) по протоколу МЭК 61850-9-2LE и российскому профилю МЭК 61850-9-2. Синхронизация устройств цифровой информационной подсистемы выполнена по протоколу PTPv2.

После введения цифровой информационной подсистемы в опытную эксплуатацию, помимо решения неизбежно возникающих вопросов совместимости

между оборудованием разных производителей, перед рабочей группой встала задача оценки работоспособности цифровой подстанции как единой системы, так и отдельных ее элементов в различных режимах работы энергосистемы. Один из ключевых вопросов – анализ совместной работы цифровых трансформаторов и устройств РЗА. С этой целью в декабре 2019 года был проведен опыт постановки автотрансформатора 250 МВА под напряжение. Результатами опыта стал сравнительный анализ работы ТТЭО и ЭМ ТТ во время броска тока намагничивания. Материалы по этой теме представлены в [2]. Для дальнейшего исследования цифровой информационной подсистемы в аварийных режимах в сентябре 2020 года проведен опыт однофазного короткого замыкания. Анализ работы ТТЭО и ДНЕЭ, а также терминалов релейной защиты во время опыта КЗ представлен в текущей статье.

ОПИСАНИЕ ПОСТАНОВКИ ОПЫТА ОДНОФАЗНОГО КЗ НА ВЛ 500 кВ

Натурный опыт однофазного КЗ проведен на ВЛ 500 кВ Тобол – ЗапСиб II, соединяющей ГПП нефтехимического предприятия по глубокой переработке углеводородного сырья «ЗапСибНефтехима» (проект компании «Сибур») с ПС 500 кВ Тобол. Цель опыта КЗ – тестирование работоспособности цифровой информационной подсистемы ЦПС 500 кВ Тобол через оценку совместной работы устройств РЗА и цифровых трансформаторов, в также сравнение измерений с электромагнитными трансформаторами тока типа ТГФ-500 2000/1А, 0,2/10Р производства АО ВО «Электроаппарат» (далее ЭМ ТТ) и трансформаторами напряжения с емкостными делителя напряжения типа ТСVT-550 производства Trench, которые конструктивно соответствуют отечественному типу трансформаторов напряжения НДЕ (для удобства – далее НДЕ). В таблице 1 представлены характеристики измерительных трансформаторов. Терминалы ступенчатых защит всех трех производителей подключены к одним и тем же клеммам измерительных трансформаторов. Стоит отметить, что на время опытной эксплуатации цифровой информационной подсистемы, устройства РЗА, получающие информацию о токах и напряжениях по протоколу МЭК-61850, работают на сигнал. Однако реализация функций защит как по «традиционным» аналоговым, так и цифровым каналам позволила провести сравнительный анализ работы обеих систем.

Для описания методики проведения опыта КЗ представим упрощенную однолинейную схему, оборудования ЦПС 500 кВ Тобол, участвовавшего в эксперименте. На схеме ТТЭО и ДНЕЭ обо-



Рис. 1. ТТЭО-500 кВ производства АО «Профотек»



Рис. 2. ДНЕЭ-500 кВ производства АО «Профотек»

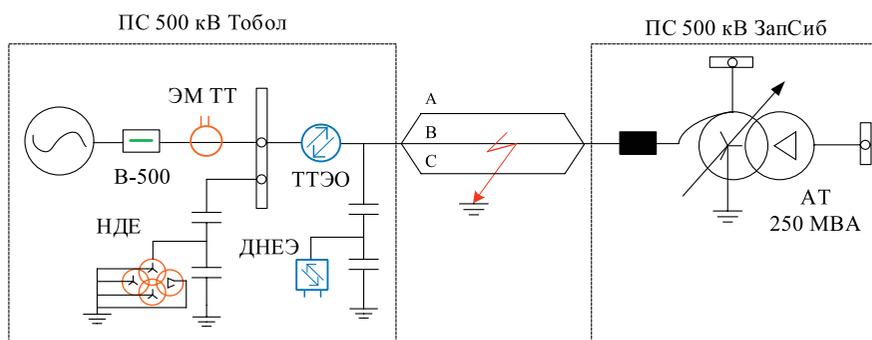


Рис. 3. Упрощенная однолинейная схема ЦПС 500 кВ Тобол, задействованной в опыте КЗ

значены синим цветом, ЭМ ТТ и НДН – оранжевым.

В рамках проведения опыта КЗ была разработана программа переключений для подготовки и проведения опыта короткого замыкания фазы В на землю.

АНАЛИЗ ОПЫТА ОДНОФАЗНОГО КЗ

Представленный сравнительный анализ работы цифровых и аналоговых измерительных трансформаторов основан на данных, полученных от функции регистрации аварийных событий (РАС) в терминалах ступенчатых защит трех производителей на ПС 500 кВ Тобол. При этом, РАС в терминале производства ООО «Сименс» одновременно получает как аналоговые, так и цифровые сигналы. В то время как ООО «НПП «ЭКРА» и ООО «Релематика» реализовали регистрацию

Таблица 1. Характеристики измерительных трансформаторов

Наименование	Номинал	Класс точности	Производитель
ТГФ-500	2000 А	0,2/10Р	АО ВО «Электроаппарат»
ТСVT-550	500 кВ	0,2/0,2/3Р	Trench
ТТЭО-Ш500	300 А	0,2s/5TRP	АО «Профотек»
ДНЕЭ-500	500 кВ	0,2/3Р	АО «Профотек»

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

Канафеев Р.И., руководитель департамента испытательного центра АО «Профотек»

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

Шеметов А.С., начальник управления развития РЗА и метрологии ПАО «Россети»

Козырев А.В., заместитель начальника Службы РЗА АО «СО ЕЭС»

Антипин В.С., главный специалист Службы РЗА АО «СО ЕЭС»

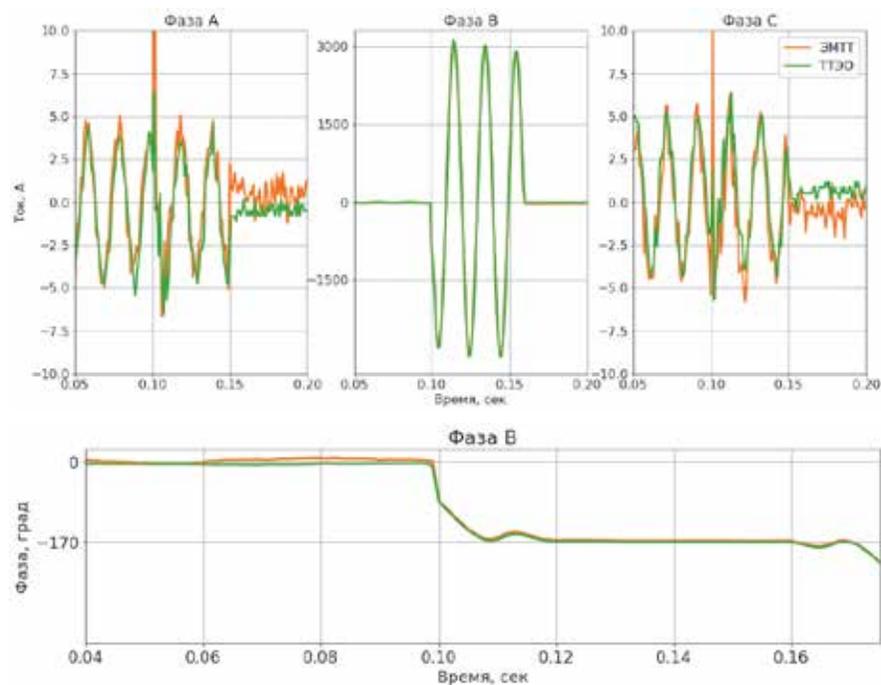


Рис. 4. Сравнение кривых тока по трем фазам и изменение фазового угла на фазе В

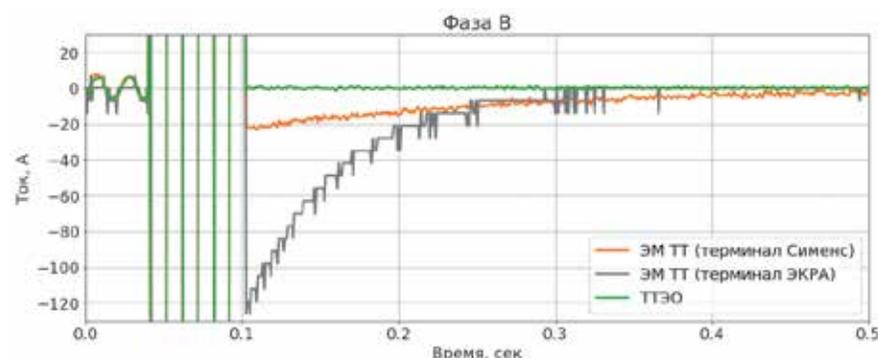


Рис. 5. Ток в «поврежденной» Фазе В в момент переходного процесса

аналоговых и цифровых измерений путем установки двух отдельных терминалов, один из которых регистрирует аналоговые измерения, другой цифровые. Измерения с цифровых трансформаторов передавались в виде SV-потока с частотой дискретизации 80 точек на период по протоколу IEC 61850-9-2LE.

Сравнительный анализ работы ТТЭО и ЭМ ТТ

Для более точного понимания результатов, полученных при анализе снятых в ходе опыта осциллограмм, сравним принцип работы ТТЭО и ЭМ ТТ.

В основу ЭМ ТТ положен принцип электромагнитной индукции. Количество витков вторичной обмотки, намотанных на сердечник, определяют коэффициент трансформации и, как следствие, величину

вторичного тока. Сам сердечник представляет собой нелинейный элемент, подверженный насыщению. В режиме насыщения ЭМ ТТ неизбежно вносит искажение во вторичный ток. Более того, вторичная нагрузка с аналоговыми цепями так же способна оказывать дополнительное влияние на форму вторичного тока. Стоит отметить, что принцип работы ЭМ ТТ не позволяет измерять постоянный ток.

ТТЭО используют неэлектрический принцип измерения тока, основанный на магнитооптическом эффекте Фарадея. Вследствие этого эффекта в оптической среде возникает круговое двулучепреломление под действием внешнего магнитного поля. Таким образом вблизи проводника с током в оптической среде между двумя световыми волнами с круговой поляризацией появляется фазовый сдвиг, который пропорционален продольной составляющей магнитного поля, создаваемого этим током. Таким образом, ТТЭО измеряет величину тока путем вычисления фазового сдвига между двумя световыми волнами. ТТЭО могут быть использованы как для измерения переменного тока, так и постоянного.

Характеристики ТТЭО были подробно исследованы и представлены в [3-4].

Характеристики ТТЭО были подробно исследованы и представлены в [3-4].

Анализ кривых по форме и фазовому углу

Общий вид кривых тока, записанных синхронно терминалом по цифровому и аналоговому каналам, представлен на рис. 4. Из рисунка видно, что до момента КЗ в линии присутствовал ток равный величине наведенного тока и составлял порядка 5 А. В момент замыкания фазы В на землю через место КЗ потек ток с действующим значением 2.2 кА и максимально пиковым значением порядка 3.2 кА. Время отключения КЗ – 3 полных периода промышленной частоты 50 Гц, таким образом продолжительность КЗ составила 60 мс. В неповрежденных фазах, в фазе А и фазе В, ток не изменил своего около нулевого значения. Из рисунка видно, что формы кривых тока, полученных от ЭМ ТТ и ТТЭО полностью совпадают как по амплитуде, так и по фазе, во время КЗ, где в качестве базисного угла выбрана фаза В ТТЭО.

Однако анализируя рис. 5, видно, после отключения линии ЭМ ТТ выдают недостоверные значения, обусловленные появлением постоянной составляющей, которая постепенно снижается до нуля. Из рисунка видно, что величина постоянной составляющей отличается на разных терминалах. Для терминала Siprotec-5 постоянная составляющая составляет порядка 23 А, для терминала ЭКРА постоянная составляющая составляет порядка 124 А. Оптические трансформаторы сразу же после отключения выключателя передают корректное нулевое значение тока, так как цепь для протекания тока была разомкнута. Также из этого рисунка видно, что шумовой ток ТТЭО меньше, чем ток, полученный при оцифровке ЭМ ТТ терминалами РЗА.

Анализ гармонического состава

На рис. 6 представлено сравнение 0-й и 1-й гармоник тока с ЭМ ТТ и ТТЭО по действующему значению для «поврежденной» фазы В. Из рисунка видно, что

действующее значение по 1-й гармонике для ЭМ ТТ и ТТЭО практически полностью совпадает. В то время как в действующем значении тока по 0-й гармонике присутствует небольшая разница в измерениях. Эта разница вызваны эффектом намагничивания сердечника ЭМ ТТ. Стоит отметить, что аperiodическая составляющая тока во время КЗ была существенно мала, в результате чего работа ЭМ ТТ наблюдалась без явного насыщения сердечника. В противном случае, искажение измерений насыщенным ЭМ ТТ могло бы быть гораздо более значительным.

Сравнительный анализ работы ДНЕЭ и НДЕ

На линиях электропередачи 500 кВ и выше большое распространение получили ТН на основе емкостных делителей напряжения, состоящих из двух последовательно соединенных конденсаторов С1 и С2. Прежде чем приступить к анализу осциллограмм по результатам опыта КЗ, кратко приведем информацию о конструкции ДНЕЭ и сравним ее с классическим НДЕ.

ДНЕЭ и НДЕ оба используют емкостные делители для понижения первичного напряжения. Однако есть две принципиальные различия. Во-первых, в НДЕ используется две ступени понижения напряжения: первая ступень реализуется через соотношение емкостей, при этом первичное напряжение снижается до величины порядка 15 кВ; вторая ступень – это классический ЭМ ТН, который понижает напряжение до номинального вторичного напряжения и принцип которого основан на законе электромагнитной индукции. В ДНЕЭ, в отличие от НДЕ, соотношение между емкостями подобрано таким образом, что вторичное напряжение составляет 57,7 В. Во-вторых, ЭМ ТН подключен через аналоговые выходы к вторичным устройствам, нагрузка которых так же способна оказывать дополнительное влияние на форму вторичного сигнала. В ДНЕЭ аналоговый сигнал преобразуется в цифровой в месте установки колонны, который передается по оптическому кабелю, поэтому вторичная нагрузка совершенно не оказывает влияние на качество измерений и на рабочие характеристики трансформатора. Принципиальная схема замещения высоковольтной части ДНЕЭ представлена на рис. 7.

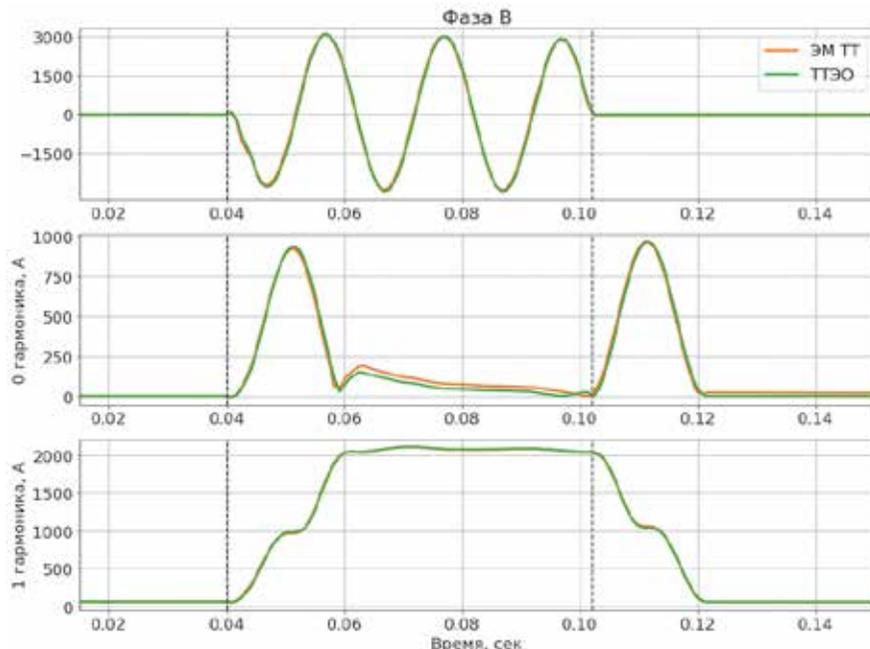


Рис. 6. Сравнение действующих значений 0-й и 1-й гармоник для фазы В во время КЗ

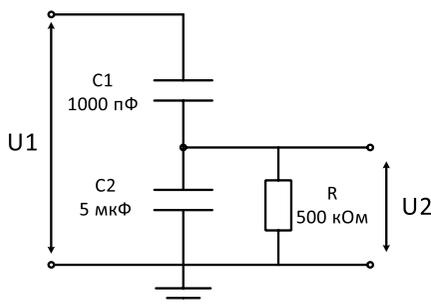


Рис. 7. Схема замещения высоковольтной части ДНЕЭ

Принципиальная схема TCVT-550 представлена на рис. 8.

Сравнительный анализ кривых напряжения по форме и фазовому углу

На рис. 9 представлены осциллограммы кривых напряжения, полученные в результате опыта КЗ. Из рисунка видно, что на поврежденной Фазе В измерения с НДЕ и ДНЕЭ практически совпадают по форме до, во время и после КЗ. Глядя на неповрежденные фазы, т.е. фазу А и фазу С, можно увидеть, что до и во время КЗ измерения совпадают, однако, после отключения выключателя, формы кривых отличаются. Отличие заключается в двух вещах. Во-первых, после того как ВЛ была отключена по обем концам, НДЕ и ДНЕЭ показывают постепенный разряд емкости линии и нижнего плеча делителя в виде затухающей по амплитуде аperi-

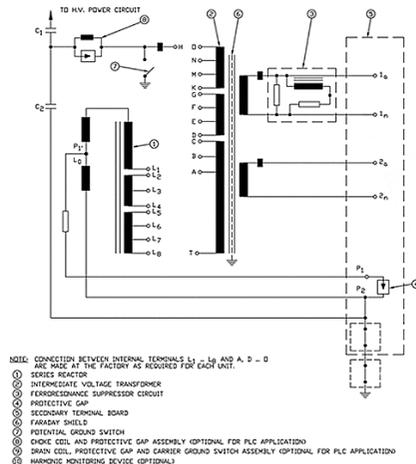


Рис. 8. Схема TCVT-550 (с сайта производителя): 1 – реактор; 2 – ТН; 3 – контур для подавления ферро резонанса; 4 – защитный разрядник; 5 – вторичные выходы; 6 – экран (клетка Фарадея); 7 – ключ; 8 – дроссельная катушка и защитный разрядник (дополнительно для PLC связи)

одической составляющей с наложенным на нее наведенным напряжением от соседних линий. Однако, процесс разряда нижнего конденсатора на вторичную нагрузку протекает с разной скоростью из-за разных значений вторичных нагрузок. Для ДНЕЭ вторичная нагрузка представляет резистивный элемент с величиной активного сопротивления $R \sim 0,5$ МОм. Емкость нижнего конденсатора $C2 = 5$ мкФ. Отсюда по-

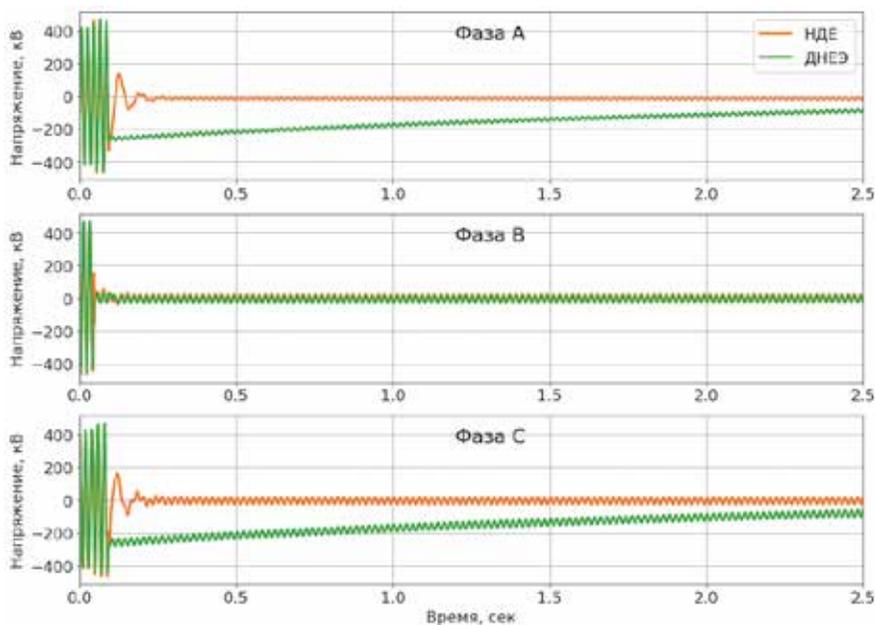


Рис. 9. Сравнение кривых напряжения

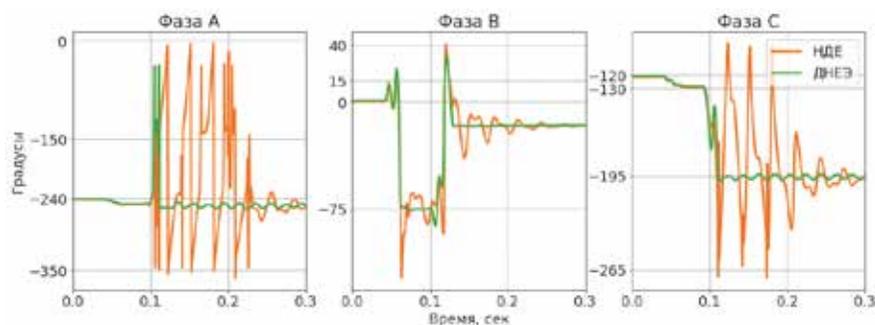


Рис. 10. Сравнение изменения угла фазового сдвига

стоянная времени разряда конденсатора ~2,5 сек. Это и объясняет возникшую длительную апериодическую составляющую. Говоря про разряд нижнего конденсатора НДЕ, можно сказать, что этот конденсатор с заведомо меньшей емкостью нижнего плеча разряжался на гораздо меньшее сопротивление индуктивного делителя, нагруженного вторичными цепями. В результате чего постоянная времени составила доли секунд с переходным резонансным процессом, который хорошо виден на осциллограммах.

Второе отличие состоит в том, что в состав НДЕ входит ЭМ ТН с нелинейной характеристикой и, как следствие, индуктивной нагрузкой, это внесло дополнительные искажения в измерения при переходном процессе продолжительностью 136-150 миллисекунд, что и обусловило наличие ярко выраженных колебаний напряжения. Тогда как, у ДНЕЭ переход-

ный процесс после отключения КЗ продолжительностью 1 мс сопровождался практически с полным отсутствием «вредных» колебаний напряжения. Это будет нагляднее показано ниже, где рассмотрена динамика изменения действующих значений напряжения по каждой из гармоник.

Также можно оценить влияние искажения сигнала высшими гармониками на фазовый угол, представленный на рис. 10, где за базовый сигнал принята фаза В ДНЕЭ. Из рис. 10 видно, что угол по каждой фазе до возникновения КЗ совпадает по величине, далее после отключения КЗ происходит смещение угла, обусловленное переходом на измерение наведенного напряжения. Значения с ДНЕЭ практически сразу принимают стабильное значение, у НДЕ наблюдается длительный скачкообразный переходный процесс обусловленный все тем же образованием колебательного контура, описанного выше.

Анализ гармонического состава

Как уже было сказано ранее, гармонический состав сигналов напряжения, зафиксированный НДЕ и ДНЕЭ отличается. Во время переходного процесса из-за искажений, вносимых индуктивной частью и вторичной нагрузкой НДЕ, в измерениях присутствуют высшие гармоники. Рис. 11 показывает сравнение динамики изменения действующего значения напряжения по отдельным гармоникам для ДНЕЭ и НДЕ до, во время и после КЗ по каждой фазе. Из рисунка видно, что до момента возникновения КЗ гармонический состав сигналов напряжения совпадает, о чем свидетельствует сходство кривых друг с другом. В момент возникновения КЗ и после его отключения, видно, возникшее изменение и разницу в величине напряжения для каждой из гармоник. На рис. 12 показана погрешность НДЕ относительно ДНЕЭ, приведенная к амплитуде номинального фазного напряжения т.е. к 408 кВ.

Сравнивая изменение величины действующего значения напряжения по каждой гармонике на поврежденной Фазе В, можно сказать, что динамика изменения практически совпадает у НДЕ и ДНЕЭ. Отличие присутствует лишь в 0-й гармонике, а именно плавное затухание постоянной составляющей у ДНЕЭ. На основании сравнения напряжений в неповрежденных фазах можно сделать следующие выводы:

- разница в 0-й гармонике обусловлена разницей постоянной времени в процессе разряда нижнего конденсатора, о которой уже говорилось ранее. При этом наглядно видно возникновение колебательного контура у НДЕ и отсутствие у ДНЕЭ;
- для других гармоник форма кривых до и во время КЗ совпадает. Исключение составляет 3-я гармоника, уровень которой практически в 2 раза больше у НДЕ;
- после КЗ высшие гармоники у ДНЕЭ мгновенно принимают нулевые значения. В то время как у НДЕ они только возрастают.

Таким образом можно сделать вывод, что значения напряжения с ДНЕЭ максимально точно описывают реальные процессы, протекающие в линии.

Анализ работы РЗА

На основании отчетов, предоставленных производителями устройств РЗА по результатам анализа работы терминалов защит во время опыта КЗ, можно сделать следующие выводы:

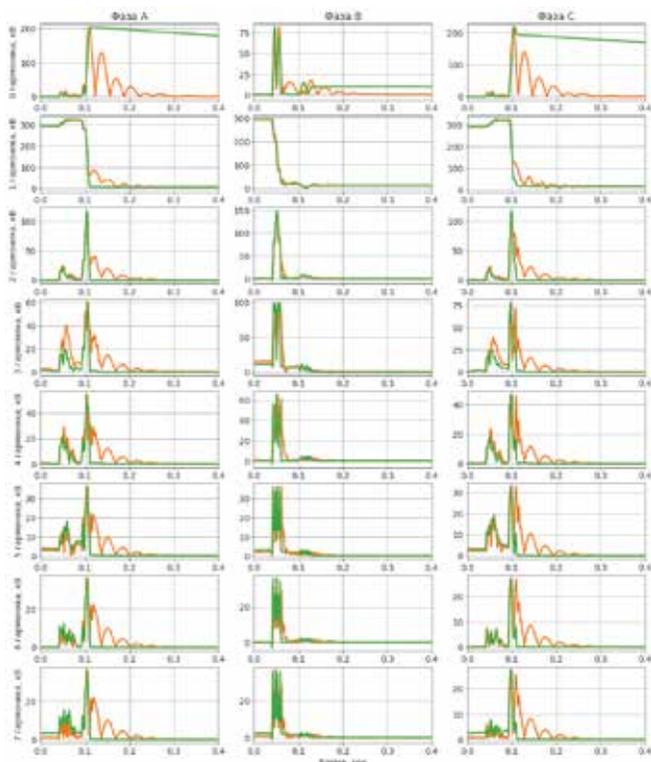


Рис. 11. Сравнение динамики изменения действующих значений гармоник для НДЕ (оранжевый цвет) и ДНЕЭ (зеленый цвет)

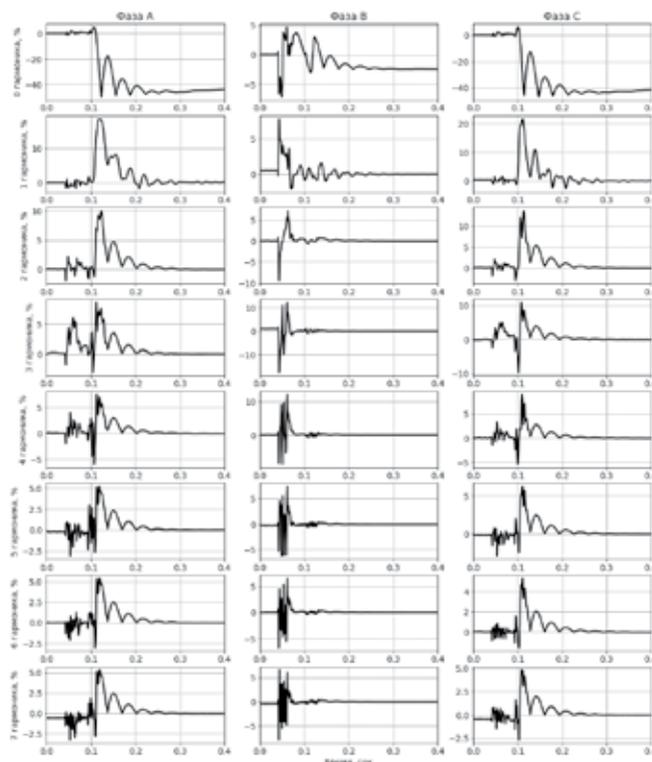


Рис. 12. Относительная погрешность от амплитуды номинального фазного напряжения

- в SV потоках от ТТЭО и ДНЕЭ отсутствовали значения с признаками недостоверности, были выявлены пропадания пакетов, также отсутствовали сбои синхронизации устройств комплекса;
- подтверждена корректная работа терминалов защит НПП «ЭКРА» в комплексе с ТТЭО и ДНЕЭ;
- был выявлен отказ срабатывания (блокировка) функций релейной защиты терминала ООО «Сименс», получающих информацию от ТТЭО и ДНЕЭ, из-за отсутствия четких стандартизованных требований по передаче значений тока $3I_0$ и $3U_0$ по протоколу МЭК-61850, что привело к различной их интерпретации со стороны производителя терминала и производителя цифровых измерительных трансформаторов. Особо следует отметить, что в предварительно проведенных испытаниях на совместимость ТТЭО и ДНЕЭ с РЗА ООО «Сименс» (2015, 2018, 2019, 2020гг) в терминалах Siprotec 5 функция блокировки по причине несоответствия знака $3I_0$ и $3U_0$ рассчитанными в терминале и

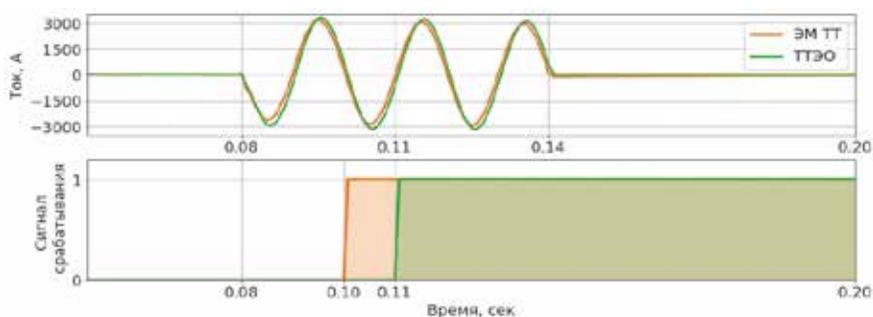


Рис. 13. Сравнение времени срабатывания защит по дискретным значениям по «поврежденной» фазе В

полученными по сети была отключена и срабатывание терминала были успешны. В корпоративном профиле МЭК 61850-9-2 ПАО «ФСК ЕЭС» данные значения также не передаются, а рассчитываются терминалом для исключения неопределенностей.

Анализ быстродействия срабатывания защит по токовым каналам показал, что сигнал на отключение В-500 был сформирован от ТТЭО на 10 мс раньше, чем от

ЭМ ТТ. На рисунке 13 представлен ток в «поврежденной» фазе В с двух трансформаторов и время отправки дискретного сигнала на отключение. В Таблице 2 представлена разница срабатывания относительно момента возникновения тока КЗ.

Функции РЗА, использующие сигналы напряжения, работают с основной гармоникой, которая выделяется путем удаления из сигнала постоянной составляющей и высших гармоник. Аperiodическая составляющая, присутствующая в измерениях напряжения у ДНЕЭ, была легко отфильтрована терминалами. При этом присутствие в сигнале ДНЕЭ основной гармоники в достаточном объеме и существенно меньшее

Таблица 2. Сравнение быстродействия срабатывания защит

Фаза	Время от момента КЗ до отправки сигнала на отключение терминалом, мс		
	ТТЭО	ЭМ ТТ	Разница
В	110	100	10

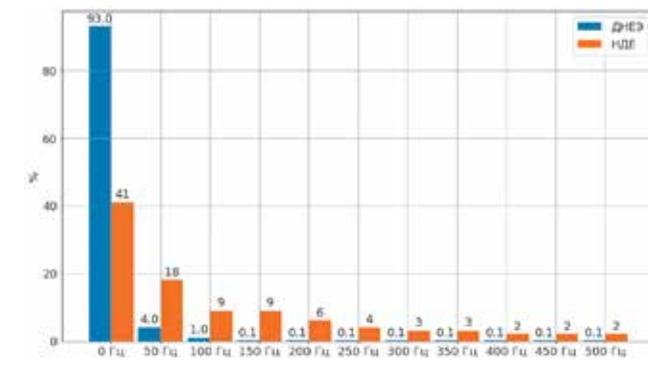
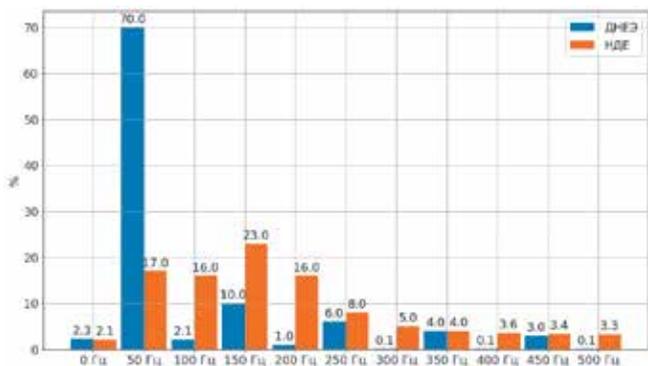


Рис. 14. Сравнение гармонического состава по поврежденной фазе В для ДНЕЭ и НДЕ

Рис. 15. Сравнение гармонического состава по неповрежденной фазе А(С) для ДНЕЭ и НДЕ

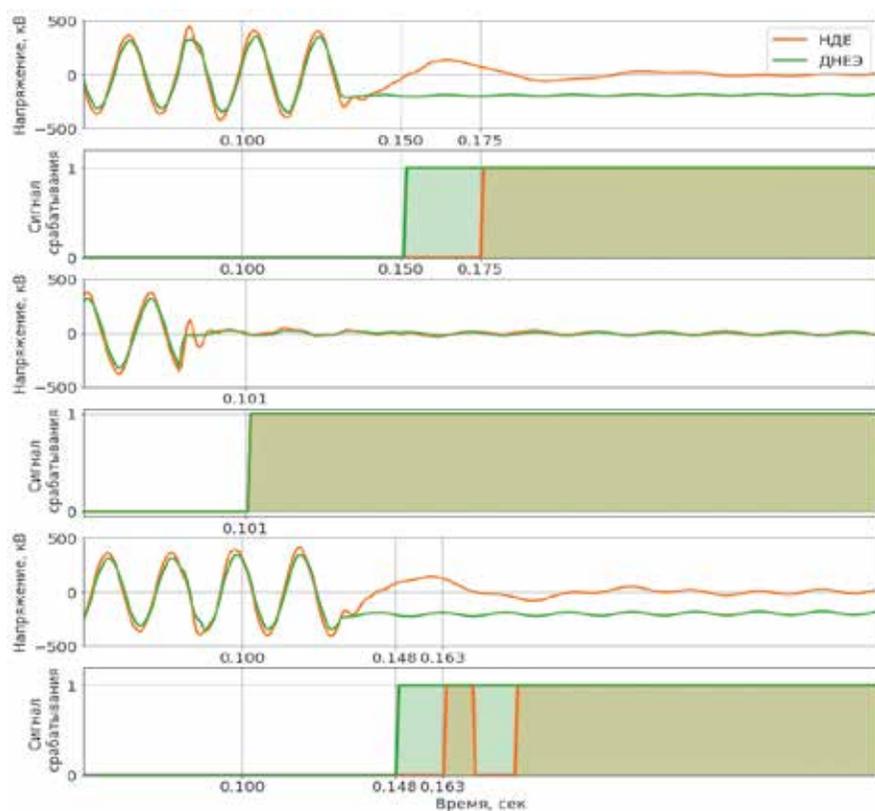


Рис. 16. Сравнение времени срабатывания защит по дискретным значениям по каждой фазе

содержание высших гармоник позволили терминалам быстрее выделить из сигнала основную гармонику и отправить сигнал на отключение выключателя. И напротив, присутствие высших гармоник в сигнале НДЕ замедлило обработку такого сигнала и как следствие отправку команды на отключение выключателя. На рис. 14 и 15 представлены диаграммы гармонического состава НДЕ и ДНЕЭ для оценки гармонического состава в во время КЗ для «поврежденной» фазы В и фаз А(С). Из рис. 12 видно, что уровень 2, 3, 4 и 5 гармоник в сигнале с НДЕ существенно больше, чем у ДНЕЭ.

На рисунке 13 для «неповрежденных» фаз, у ДНЕЭ существенно преобладает аперидическая составляющая, но отсутствуют практически отсутствуют другие высшие гармоники.

На рис. 16 представлено сравнение времени срабатывания защит по дискретным

значениям по трем фазам. В таблице 3 представлено сравнение времени которой было затрачено терминалом защит для отправки сигнала на отключение выключателя. В настоящий момент на быстродействие устройств РЗА оказывает незначительное влияние скорость доставки SV пакетов по ЛВС. При развитии коммутаторов и увеличения скорости портов данная проблема будет нивелирована и учитываться не будет.

Сравнение измерений по основным и резервным каналам ТТЭО и ДНЕЭ

Одно из преимуществ ТТЭО и ДНЕЭ – возможность полноценного резервирования измерений по каждой фазе без взаимного влияния. Резервирование измерений в ТТЭО осуществляется за счет укладки дополнительных оптических контуров в чувствительном элементе и установкой резервного ЭОБ. Резервирование в ДНЕЭ осуществляется за счет дополнительной установки выносного измерительного модуля напряжения и резервного ЭОБ. Схемы резервирования ТТЭО и ДНЕЭ представлены на рис. 17 и 18, соответственно.

На рис. 19, 20, 21 и 22 представлены осциллограммы измерений по основным и резервным каналам ТТЭО и ДНЕЭ. Сравнительный анализ работы основного и резервного измерительных каналов показал, что в во время опыта КЗ измерения совпадают по форме и по гармоническому составу при этом разница не превышает 0,1 %.

Таблица 3. Сравнение быстродействия срабатывания защит

Фаза	Время от момента КЗ до отправки сигнала на отключение терминалом, мс		
	ДНЕЭ	НДЕ	Разница
А	70	95	-25
В	21	21	0
С	68	83	-15



Рис. 17. Схема резервирования ТТЭО



Рис. 18. Схема резервирования ДНЕЭ

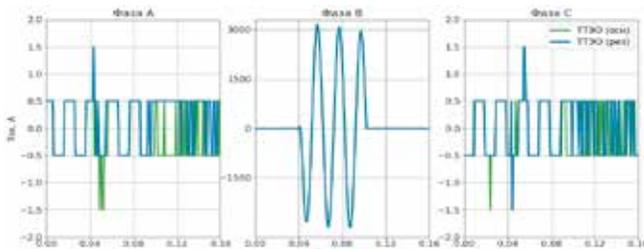


Рис. 19. Показания ТТЭО с основного и резервного измерительных каналов

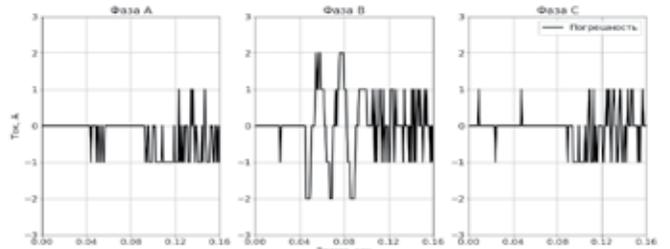


Рис. 20. Разница измерений ТТЭО относительно основного и резервного канала

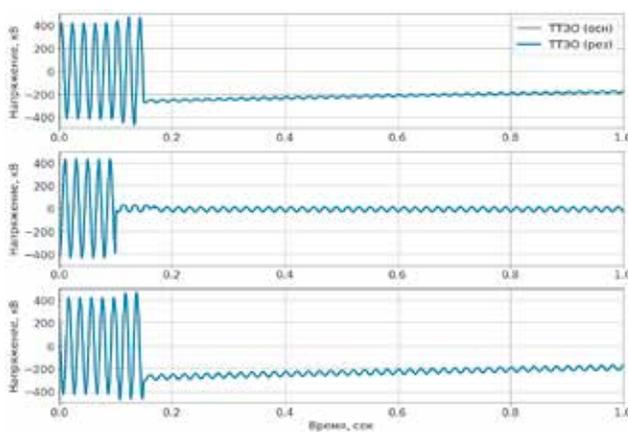


Рис. 21. Показания ДНЕЭ с основного и резервного измерительных каналов

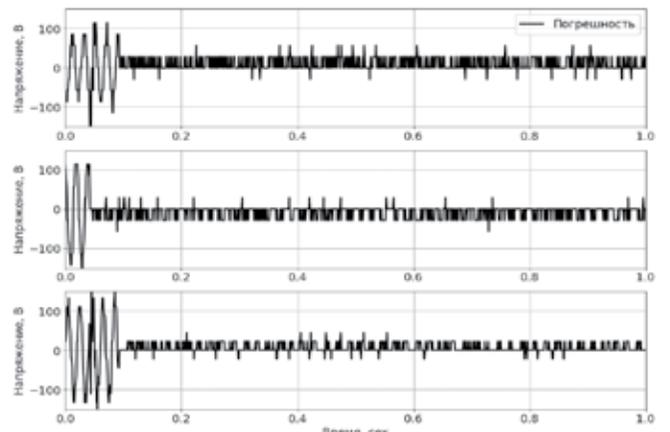


Рис. 22. Разница измерений ДНЕЭ относительно основного и резервного каналов

АНАЛИЗ АЧХ И ФЧХ ТТЭО И ДНЕЭ

Для оценки ДНЕЭ на способность измерять сигналы содержащие высшие гармоники, в лабораторных условия был сгенерирован сигнал сходный по гармоническому составу с сигналом напряжения из опыта КЗ на ЦПС 500 кВ Тобол. В качестве генератора использовался Энергомонитор-КМ. В качестве эталонного измерителя использовался цифровой мультиметр Keysight 3458А, входящий в состав поверочной установки УПКВ-61850.

Опыт подачи на высоковольтный делитель напряжения промышленной частоты с гармоническим составом, идентичным зарегистрированным в конце стационарного режима непосредственно перед КЗ, показал, что:

- спектральный состав напряжения, измеренного ДНЕЭ, полностью идентичен поданному, зафиксированному как аналоговым прибором Энергомонитор-КМ (кл. 0,02%), так и цифровым методом с помощью сэмплирования на частоте 16кГц мультиметром Keysight 3458А;
- гармонический состав напряжения, передаваемого в потоках МЭК61850 РЗА (с ФНЧ 500 Гц) и КУЭ/качества э/э (с ФНЧ 3000 Гц), полностью идентичен в части требующихся для работы РЗА гармоник;
- искажение гармонического состава напряжения происходит в аналоговых емкостных ТН типа НДЕ;

Для дальнейшего исследования характеристик ТТЭО и ДНЕЭ были сняты

их АЧХ и ФЧХ. В качестве генератора гармоник высокого порядка использовался Энергомонитор-КМ, позволяющий генерировать гармоники до 50-го порядка, то есть до 2500 Гц с номинальной частотой 50 Гц. Введенный ток (первичный ток) от источника был равен 2 А, который проходил через 100 витков медного провода, таким образом, эквивалентный первичный ток был равен 200 А. Первичное напряжение от источника находилось в диапазоне 350–580 В. Гармоники высокого порядка (от 2-й до 50-й) накладывались на сигнал с 1-й гармоникой для получения искаженных сигналов. Чтобы не выходить за пределы источника тока и напряжения, величина

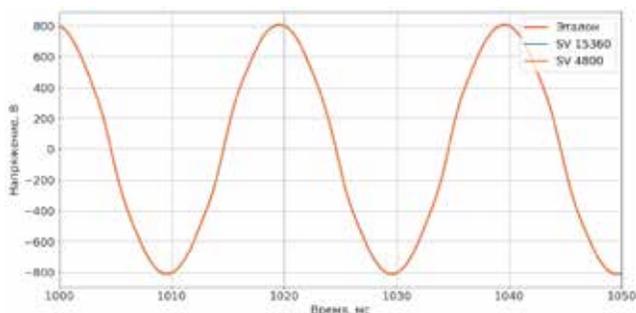


Рис. 23. Сгенерированный сигнал напряжения схожий по гармоническому составу из опыта КЗ

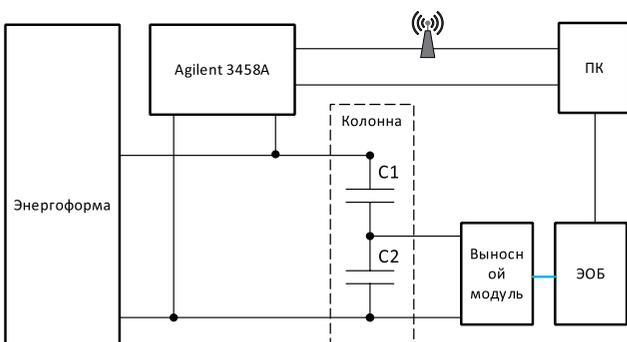


Рис. 24. Схема для испытания ТТЭО

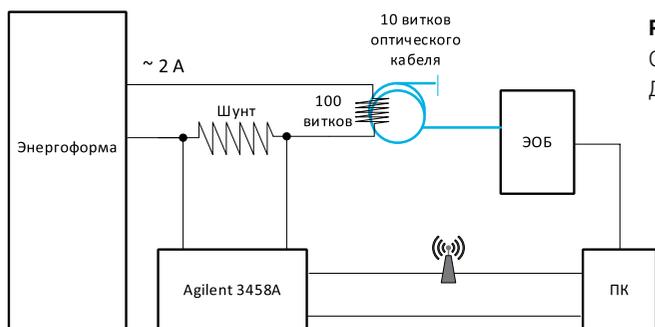


Рис. 25. Схема для испытания ДНЕЭ

наложенных сигналов регулировалась. Таким образом, величина сигналов тока с гармониками высокого порядка составила 30 % от величины сигнала с 1 гармоникой; а величина сигналов напряжения с гармониками высокого порядка составляла 50 % от величины сигнала с 1 гармоникой. ТТЭО и ДНЕЭ были настроен на передачу SV потоков с частотой дискретизации 4800 Гц (96 отсчетов за цикл) и с частотой дискретизации 15360 Гц (307,2 отсчета за период). Для SV4800 и SV15360 были выбраны фильтры нижних частот 500 Гц и 3000 Гц соответственно. В качестве эталонного прибора использовался мультиметр Agilent 3458A, частота дискретизации которого составляет 16000 Гц (320 образцов за период). Испытания проводилось со следующими схемами, представленными на рисунках 24 и 25.

Результаты испытаний представлены на рис. 26–28. Из рисунков видно, что АЧХ и ФЧХ ТТЭО и ДНЕЭ показали соответ-

ствие требованиям по ГОСТ Р МЭК 60044-8-2010 для измерения качества э/э, для КУЭ и для защиты.

В качестве сравнения на рис. 30 представлена АЧХ для TCVT-550.

Таблица 4. Погрешность ДНЕЭ

Параметр	Источник (Энергомодуль-КМ)	Эталонный поток (Agilent 3458 A)	ДНЕЭ	
			SV 4800 / Погрешность, %	SV 15360 / Погрешность, %
Частота дискретизации SV потока, Гц	-	16000	4800	15360
ФНЧ, Гц	-	-	500	3000
Частота, Гц	49,996	49,9969	49,9970 / 0,002	49,9970 / 0,002
К-т нелинейных искажений (THD), %	-	3,1126	3,1275 / 0,0015	3,1241 / 0,0115
RMS 1-й гармоники, В / Доля, %	579,505 / 100	579,5058	579,5096 / 0,007	579,4747 / -0,0054
RMS 2-й гармоники, В / Доля, %	0,6142 / 0,106	0,6436	0,6809 / 0,011	0,6810 / 0,011
RMS 3-й гармоники, В / Доля, %	13,3402 / 2,302	13,3440	13,4093 / 2,31	13,4050 / 2,31
RMS 4-й гармоники, В / Доля, %	0,54473 / 0,094	0,5605	0,5558 / 0,097	0,5560 / 0,097
RMS 5-й гармоники, В / Доля, %	10,4774 / 1,808	10,4712	10,5195 / 1,815	10,5090 / 1,14
RMS 6-й гармоники, В / Доля, %	0,54473 / 0,094	0,5734	0,5702 / 0,098	0,5702 / 0,098
RMS 7-й гармоники, В / Доля, %	5,79505 / 1,000	5,7902	5,7888 / 0,99	5,7850 / 0,99
RMS 8-й гармоники, В / Доля, %	0,57371 / 0,099	0,5864	0,6057 / 0,10	0,6052 / 0,10
RMS 9-й гармоники, В / Доля, %	1,73272 / 0,299	1,7378	1,7012 / 0,29	1,7017 / 0,29

ВЫВОДЫ

На основании представленного анализа по результатам проведения опыта однофазного КЗ на ЦПС 500 кВ Тобол можно сделать следующие выводы:

- реализованная цифровая информационная подсистема на ПС 500 кВ Тобол продемонстрировала свою работоспособность во время опыта КЗ. Сравнительный анализ работы ТТЭО с ЭМ ТТ показал, что измерения совпадают по форме, фазе и гармоническому составу. На основании этих результатов можно сделать вывод, что ТТЭО подтвердили свою работоспособность в аварийном режиме;
- сравнительный анализ работы ДНЕЭ с НДЕ показал, что ДНЕЭ обеспечил измерения с более корректными сигналами по гармоническому составу. Наличие аперидической составляющей напряжения в неповрежденных фазах после отключения ЛЭП обусловлено разрядом емкости линии на землю через изоляторы опор и нижнего конденсатора высоковольтного делителя через блок измерений;
- в ходе анализа была подтверждена абсолютная повторяемость измерений по основному и резервному каналам ТТЭО и ДНЕЭ;
- АЧХ и ФЧХ ТТЭО и ДНЕЭ показали соответствие требованиям по ГОСТ Р МЭК 60044-8-2010 для измерения качества э/э, для КУЭ и для защиты;
- отсутствие искажений SV-потоков после доработки программного обеспечения электронных оптических блоков цифровых ТТ и ТН;
- необходимость дальнейшей стандартизации требований ко всем компонентам ЦПС: источникам, транспортной ЛВС, приемникам сигналов и серверам вре-

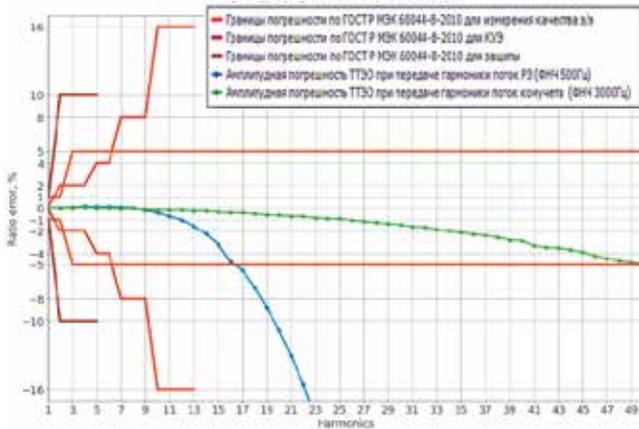


Рис. 26. АЧХ ТТЭО Профотек при передачи гармоник

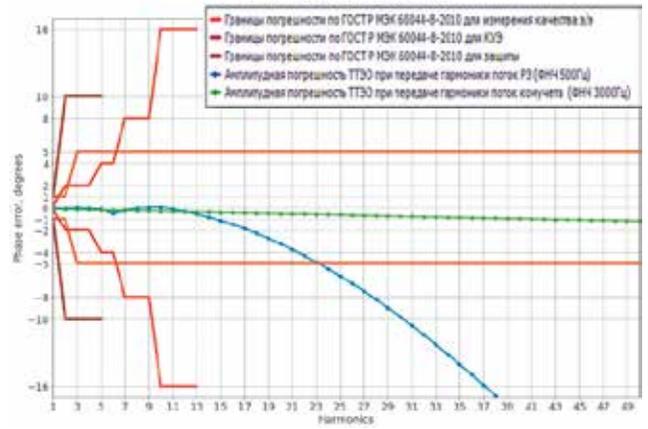


Рис. 27. ФЧХ ТТЭО Профотек при передачи гармоник

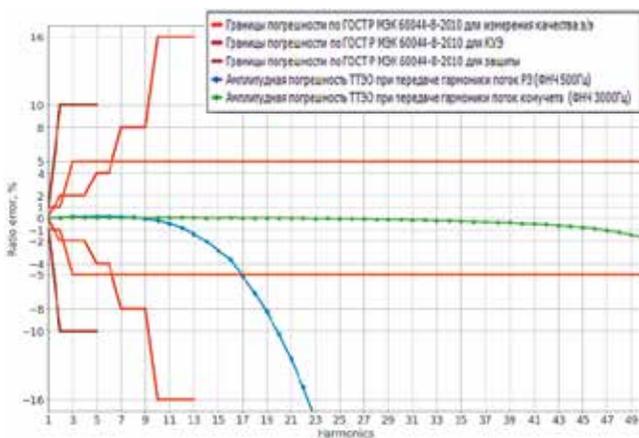


Рис. 28. АЧХ ДНЕЭ Профотек при передачи гармоник

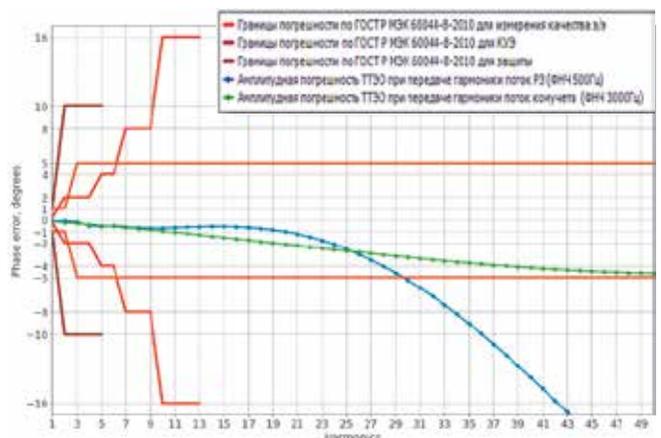


Рис. 29. ФЧХ ДНЕЭ Профотек при передачи гармоник

мени для обеспечения их стабильной совместной работы;

■ надежная работа цифровой информационной подсистемы на ПС 500 кВ Тобол возможна только при условии стабильной работы всех элементов информационной подсистемы, включая элементы локально-вычислительной сети, устройства РЗА, серверы времени, цифровые ТТ и ТН. В процессе опытной эксплуатации, в следствие проведенных всеми производителями оборудования доработок, количество выявляемых в нормальном режиме (при отсутствии возмущений в первичной сети) периодических ошибок синхронизации времени, передачи и приема SV-потоков за последние месяцы наблюдений сократилось в несколько раз, но полностью исключить их пока не удалось. Учитывая данный факт, для принятия решения о готовности промышленного применения электронных ТТ и ТН необходима дополнительная реализация пилотных проектов на других объектах энергетики.

Опыт работы группы на ПС 500 кВ Тобол показал правильность подобного подхода к внедрению инновационных технологий. Благодаря кропотливой работе доказана перспективность применения современных измерительных трансформаторов тока и напряжения на энергетических объектах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция Цифровая трансформация 2030 ПАО «Россети». https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf.
2. Янин М.А., Шеметов А.С., Козырев А.В., Канафеев Р.И., Иванов Н.А. Текущие результаты опытной эксплуатации электронных ТТ и ТН 500 кВ. «Энергоэксперт», № 1, 2020 г.
3. S. Kucuksari and G. Karady. "Experimental comparison of conventional and optical current transformers," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 2455–2463, 2010.
4. S. Kucuksari and G. Karady. Complete model development for an optical current

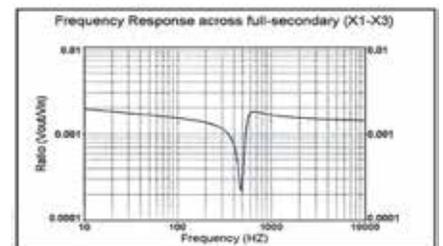


Рис. 30. АЧХ TCVT-550 (взято с сайта производителя)

transformer," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 4, pp. 1755–1762, 2012.

5. R.E. Cosse, D.G. Dunn, and R.M. Spiewak. "Ct saturation calculations: Are they applicable in the modern world?—part i: The question," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, no. 2, pp. 444–452, 2007.
6. R.E. Cosse, D.G. Dunn, R.M. Spiewak, S.E. Zocholl, T. Hazel, D.T. Rollay. "Ct saturation calculations are they applicable in the modern world? part ii, proposed responsibilities," IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference. IEEE, 2007, pp. 1–11.