Авторы:
к.т.н. Яблоков А.А.,
Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, г. Иваново, Россия,
Панащатенко А.В.,
ООО НПО «Цифровые измерительные трансформаторы», г. Иваново, Россия,
к.т.н. Шамис М.А.,
Иванов Ф.А.,
ЗАО «ЭнЛАБ», г. Чебоксары, Россия.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Аннотация: исследования трансформаторов тока (ТТ) на соответствие требованиям ГОСТ Р 58669-2019 при переходных процессах показали необходимость измерения параметров ТТ во всем диапазоне их работы. Для этого целесообразно использование специализированных средств анализа характеристик ТТ. В статье представлены основные требования и функциональные возможности двух наиболее известных в России таких анализаторов РСТ200 и CT Analyzer.

Ключевые слова: автоматическое снятие характеристик ТТ, остаточная намагниченность, время до насыщения ТТ, РСТ200, CT Analyzer.

Яблоков Андрей Анатольевич
В 2012 г. окончил ИГЭУ, кафедра «Системы управления».
В 2016 г. там же защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка и исследование первичного преобразователя напряжения измерительного трансформатора для цифровой подстанции 110-220 кВ».
Доцент кафедры «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» ИГЭУ.

Введение

Документация по нормам испытания электрооборудования [1-3] регламентирует необходимость определения характеристик ТТ при вводе в эксплуатацию, после восстановительного или капитального ремонта электрооборудования, а также при периодическом технологическом обслуживании ТТ, которое проводится не реже, чем 1 раз в 8 лет. В ходе испытаний и технического обслуживания ТТ [1-4] определяется полярность выводов первичной и вторичной обмоток, вольт-амперная характеристика (ВАХ), коэффициент трансформации, сопротивление вторичных обмоток постоянному току, погрешности преобразования тока и др.

Анализ аварийных ситуаций, произошедших из-за ложного срабатывания релейной защиты на Ростовской АЭС в 2014 г. и ПС «Тамань» в 2018 г., инициировал обновление требований, предъявляемых к работе ТТ в переходных режимах, и проведение исследований по определению времени до насыщения магнитопровода ТТ на электроэнергетических объектах [5] в соответствии с введённым впервые ГОСТ Р 58669-2019 [6]. Указанный стандарт регламентирует определение времени до насыщения ТТ как при отсутствии, так и при наличии максимально возможного значения остаточной намагниченности. Данный параметр также должен определяться при исследовании ТТ для достижения максимальной точности в определении времени до насыщения.

В международных стандартах для ТТ, предназначенных для работы в переходных режимах, вводятся дополнительные параметры (постоянная времени вторичной цепи, номинальная эквивалентная предельная вторичная электродвижущая сила (ЭДС) и др.), которые должны быть указаны в эксплуатационной документации и необходимы для выбора ТТ при проектировании энергообъекта [7-9].

В связи с вышесказанным актуальным является использование переносных приборов, позволяющих определять все указанные выше параметры ТТ в автоматическом режиме.

Исследования эксплуатационных характеристик ТТ

В рамках выполнения договорных работ авторами статьи были проведены исследования 996 трёхфазных комплектов ТТ, установленных на пятнадцати энергообъектах Российской Федерации. По полученной эксплуатационной документации было установлено, что, в основном, определение ВАХ ТТ производится в соответствии с минимальными требованиями нормативной документации [2] и только по трем точкам до начала насыщения магнитопровода ТТ. Определение точки перегиба ВАХ, соответствующей насыщению магнитопровода,

иногда не производится ввиду ограничений, связанных с максимально допустимым напряжением изоляции вторичных цепей ТТ. Также были обнаружены сильно искаженные и неверные ВАХ, которые, как оказалось, были получены из-за неправильного применения обслуживающим персоналом методик или схем испытаний ТТ. ВАХ позволяет выявлять межвитковые короткие замыкания (КЗ) и является ключевой характеристикой при определении исправности ТТ и его погрешностей [4]. Поэтому правильное измерение ВАХ имеет решающее значение при определении возможности дальнейшей эксплуатации ТТ в нормальных и аварийных режимах. Например, один из наиболее точных методов определения времени до насыщения магнитопровода ТТ по ГОСТ Р 58669-2019 основывается на использовании ВАХ, полученной до значений тока намагничивания, соответствующего полной погрешности ТТ, но не менее чем до 0,1 (0,05) расчетной кратности тока КЗ. Как показали наши исследования, методы, схемы и оборудование, используемые эксплуатирующим персоналом, в основном, не позволяют определить ВАХ ТТ до требуемого значения тока намагничивания. В результате это может привести к неправильным выводам о состоянии ТТ и возникновению аварийных ситуаций.

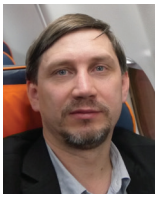
Рис. 1. Статистика результатов проверки 996 трехфазных комплектов ТТ по ГОСТ Р 58669-2019

Причиной ложного срабатывания защит на Ростовской АЭС и ПС «Тамань» явилось насыщение магнитопровода ТТ вследствие его высокой остаточной намагниченности в сочетании с протеканием тока КЗ со значительной апериодической составляющей [5, 10]. По этой причине во введённом ГОСТ Р 58669-2019 учёт остаточной намагниченности при расчётах времени до насыщения задаётся числовым коэффициентом, характеризующим предельное значение остаточной магнитной индукции равной $0{,}86B_{нас}$, где $B_{нас}$– максимальное значение магнитной индукции, соответствующее потокосцеплению насыщения обмотки ТТ. Результаты выполненных исследований по определению времени до насыщения 996 трёхфазных комплектов ТТ (рис. 1) при работе совместно с системами релейной защиты и автоматики (РЗА) показали, что даже при отсутствии в магнитопроводах ТТ предельных значений остаточной магнитной индукции не проходят проверку по времени до насыщения 41% ТТ, а ещё 34% не проходят проверку при наличии остаточной магнитной индукции $0{,}86B_{нас}$, 25% ТТ успешно проходят проверку как при наличии, так и при отсутствии остаточной намагниченности. С учётом исследований [11-15], авторы считают целесообразным использовать при расчетах фактическое предельное значение остаточной намагниченности, измеренное для каждого ТТ, которое может варьироваться в диапазоне $0{,}6B_{нас}$– $0{,}95B_{нас}$ для магнитопроводов без зазора. Такой индивидуальный подход позволит продолжить эксплуатацию большего количества используемых ТТ без опасения их неправильной работы при КЗ. Методики определения данной характеристики в лабораторных условиях представлены в ПНСТ 283-2018 [16], однако определять данную характеристику желательно на месте эксплуатации ТТ. Следует также отметить, что персонал энергообъектов и наладочных организаций часто не уделяет должного внимания размагничиванию ТТ после проведения испытаний по определению характеристик ТТ. Например, остаточная намагниченность магнитопровода ТТ при аварии на Ростовской АЭС возникла как раз при проведении пусконаладочных работ [10].

Отдельно стоит упомянуть о метрологических испытаниях ТТ, предназначенных для коммерческого учета электрической

Панащатенко Антон Витальевич
В 2017 г. окончил магистратуру ИГЭУ, кафедра «Автоматическое управление электроэнергетическими системами».
Инженер ООО НПО «Цифровые измерительные трансформаторы».

Шамис Михаил Александрович
В 1973 г. окончил Новочеркасский политехнический институт им. Серго Орджоникидзе, кафедра «Электрические станции».
В 1983 г. там же защитил кандидатскую диссертацию на тему «Средства повышения надежности статических устройств релейной защиты линий электропередач высокого и сверхвысокого напряжения».
Заслуженный изобретатель Чувашской Республики.
Заслуженный работник промышленности Чувашской Республики.
Генеральный директор ЗАО «ЭнЛАБ».



Иванов
Федор Анатольевич
В 2000 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра «Автоматика и управление в технических системах».
Технический директор ЗАО «ЭнЛАБ».

энергии. Поверка ТТ на месте эксплуатации сопряжена с необходимостью выезда передвижной высоковольтной электротехнической лаборатории, оснащённой необходимым испытательным и эталонным оборудованием. Определение метрологических характеристик производится при разных значениях тока и для несколько видов исследований, каждое из которых имеет свою методику и схему подключения. Выездная поверка ТТ для коммерческого учета, особенно для высоких классов напряжения, оказывается сложной, дорогой и требует большого количества времени, сопряженного с простоем основного электрооборудования.

Учитывая вышесказанное, для ускорения процедуры поверки ТТ, определения их параметров и обеспечения высокой повторяемости измерений, независимо от квалификации персонала, все большую актуальность приобретает использование специализированных мобильных средств измерений характеристик ТТ. Такие средства должны в автоматическом режиме определять параметры ТТ (ВАХ, остаточную намагниченность, метрологические характеристики), а по окончании измерений автоматически выполнять размагничивание магнитопровода ТТ. Использование подобных средств анализа параметров ТТ позволяет получать данные по остаточной намагниченности ТТ и точно рассчитывать время до насыщения по ГОСТ Р 58669-2019 ТТ, что даёт возможность исключить из плана модернизации формально несоответствующие, но фактически полностью пригодные к дальнейшей работе ТТ и сэкономить на их замене.

Контрольно-измерительные средства анализа параметров ТТ

Известны специализированные переносные анализаторы параметров ТТ серии PCT200 компании PONOVO и CT Analyzer компании OMICRON. В отличие от традиционного метода определения погрешности [1], при котором воздействие испытательным током осуществляется с первичной стороны ТТ, специальные анализаторы параметров ТТ создают испытательные воздействия со стороны вторичной обмотки ТТ и измеряют наведенные на первичную обмотку напряжения. Это позволило отказаться от необходимости генерации испытательных токов большой амплитуды, что существенно снизило требуемую для проведения испытаний мощность оборудования и источника питания. В ходе работы анализаторы посредством прямых измерений определяют основные параметры трансформатора и по ним автоматически составляют его модель на основе эквивалентной схемы замещения с учетом подключённой к трансформатору нагрузки. Также на основе сформированной модели расчётным путём определяются дополнительные характеристики ТТ в переходных режимах. Среди ключевых особенностей применения анализатора ТТ следует выделить следующее:

- Определение метрологических характеристик ТТ выполняется в автоматическом режиме, без использования дополнительных источников тока и эталонных трансформаторов, т.к. анализатор сам генерирует эталонные сигналы и сравнивает их с сигналами от проверяемого ТТ.
- Снятие ВАХ производится во всём диапазоне работы ТТ, включая глубокое насыщение. Анализатор использует испытательные сигналы тока различной частоты и формы, чтобы обеспечить глубокое насыщение магнитопровода.
- Вследствие того, что испытательный сигнал подается на вторичную обмотку при имеющемся ограничении максимального приложенного к ней напряжения в 120 В, это позволяет исключить перенапряжение и пробой изоляции обмотки ТТ, а также обезопасить работу персонала.
- Процедура автоматических измерений параметров ТТ занимает весьма малое время (примерно 1-5 мин), которое зависит от размеров испытуемого ТТ.
- Анализатор автоматически формирует протокол испытаний, содержащий все измеренные значения.
- За счет небольшого размера и веса анализатор можно переносить вручную и располагать в непосредственной близости от испытуемых ТТ как на открытых, так и на закрытых распределительных устройствах. Небольшая потребляемая мощность позволяет использовать питание от относительно слабой питающей однофазной сети.
- Вследствие заложенных принципов проведения испытаний можно определять параметры встроенных ТТ, к которым

Таблица 1. Технические характеристики анализаторов ТТ PCT200Ai и CT Analyzer

Параметры	PCT200Ai	CT Analyzer
Виды проверяемых трансформаторов	ТТ, применяемые для целей коммерческого учёта и измерений ТТ, применяемые для целей защит классов P, TPS, TPX, TPY и TPZ	
	Индуктивные трансформаторы напряжения	-
Выходное напряжение	(0-120) В	(0-120) В
Выходной ток	(0-5) А. 15А пиковое	(0-5) А
Выходная мощность	(0,0001-500) ВА. 1500 ВА пиковое	400 ВА
Максимальный коэффициент трансформации	30 000:1 или 45 000:5	10000
Погрешность измерения коэффициента трансформации (в диапазоне)	0,05%	0,05%
Максимальное напряжение в точке перегиба	45 000 В	-
Диапазон измерений сопротивления	0,001-1000 Ом	0,1 мОм-300 Ом
Погрешность измерения сопротивления	0,05%±1 мОм	0,1%±1 мОм
Определяемые характеристики	**Испытания ТТ**	
	Испытания в соответствии со стандартами: IEC60044-1; IEC60044-6; ANSI30; ANSI45 Коэффициент трансформации Определение полярности Амплитудная и угловая погрешность Сопротивление обмоток и подключенной нагрузки Коэффициент предельной кратности (ALF) Кривая предельной кратности Коэффициент безопасности (FS) Остаточная индукция и намагниченность (Kr) Сопротивление нагрузки ВАХ и определение точки перегиба ВАХ Коэффициент переходного режима (Ktd) Коэффициент номинального симметричного тока короткого замыкания (Kssc) Максимальное значение мгновенной погрешности Полная погрешность (εc) Постоянная времени вторичной цепи ТТ (Ts) Номинальная эквивалентная предельная вторичная ЭДС (Eal) Классы и параметры ТТ, предназначенные для работы в переходных режимах (типов TPS, TPX, TPY и TPZ)	
	Испытания ТН	
	Коэффициент трансформации Определение полярности Сопротивление нагрузки Характеристика намагничивания	-
Размеры (Ш×В×Г), мм	470×200×245	360×285×145
Вес	11 кг	8 кг

в обычном случае, подключение с первичной стороны возможно только через неотключаемые части электрооборудования. Например, параметры ТТ, встроенного в силовой трансформатор.

• Определение сопротивления вторичной обмотки ТТ проводится при текущей температуре, а далее автоматически пересчитывается для требуемых рабочих значений (25, 40 и 75°С).

• По окончании процедуры испытаний анализатор проводит автоматическое размагничивание магнитопровода ТТ.

Технические и конструктивные характеристики упомянутых анализаторов ТТ представлены в табл. 1.

Исследование характеристик ТТ типа ТЛК

Сравнение результатов измерения характеристик ТТ программно-аппаратными комплексами PCT200i и CT Analyzer было выполнено для трансформатора ТЛК-СТ-10-4-0,5/10P10/0,2S-10ВА/15ВА/10ВА-100/5 (ТЛК) производства АО «Самарский трансформатор» (рис. 2, 3).

Анализ результатов экспериментальных исследований (табл. 2, рис. 4) позволяет сделать вывод о том, что показания и диапазон измерений обеих измерительных систем совпадают в пределах их погрешно-

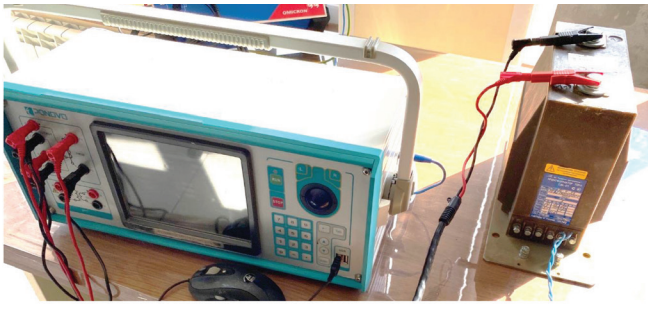


Рис. 2. Измерение параметров трансформатора ТЛК анализатором PCT200i

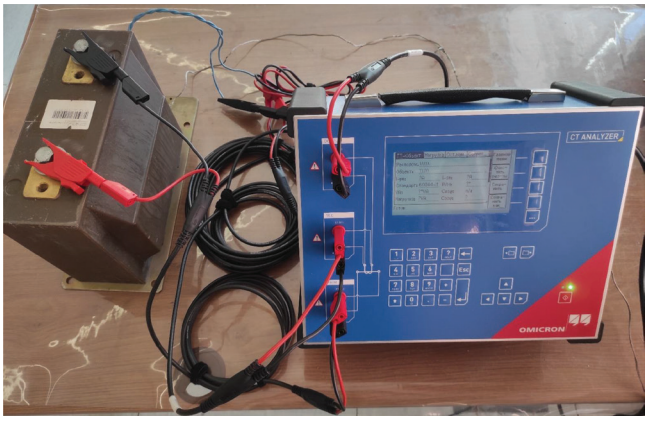
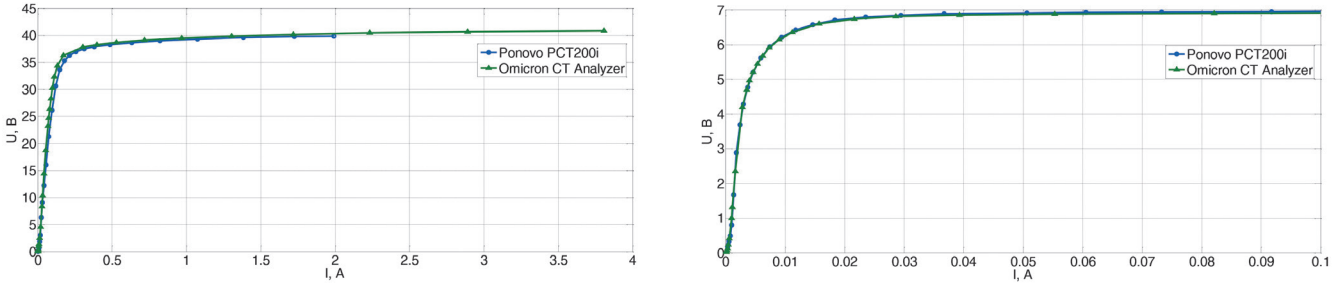


Рис. 3. Измерение параметров трансформатора ТЛК анализатором CT Analyzer



а) *б)*

Рис. 4. ВАХ обмоток трансформатора типа ТЛК: а) обмотка №2 (класс 10Р); б) обмотка №3 (класс 0.2S)

стей. Оба анализатора снимают ВАХ до области глубокого насыщения и в связи с этим могут использоваться для целей определения времени до насыщения ТТ (табл. 3).

Из табл. 3 видно, что по требованиям ГОСТ 58669-2019 при значении предельной остаточной намагниченности $B_{нас} = 0{,}86$, действующем токе 1000 А и апериодической составляющей с постоянной времени 30 мс

Таблица 2. Результаты исследований ТЛК при помощи анализаторов ТТ PCT200i и CT Analyzer

Характеристика / параметр	Обмотка №1 (класс 0,5)			Обмотка №2 (класс 10Р)			Обмотка №3 (класс 0,2S)		
	PCT200i	CT Analyzer	ПСИ	PCT200i	CT Analyzer	ПСИ	PCT200i	CT Analyzer	ПСИ
Точка перегиба ВАХ:									
U, В	10,70	10,69	-	33,05	33,04	-	5,54	5,48	-
I, А	0,05	0,05	-	0,14	0,12	-	0,005	0,005	-
Постоянная времени вторичной цепи ТТ, с	1,48	1,41	-	1,30	1,71	-	9,94	10,81	-
Предельное значение остаточной магнитной индукции, %	89,0	89,5	-	36,1	31,5	-	63,9	62,3	-
Коэффициент предельной кратности	>5,20	5,19	-	>10,26	>10,46	-	2,78	2,76	-
Индуктивность насыщения, Гн	0,69	0,66	-	0,44	0,42	-	4,48	4,90	-
Сопротивление вторичной обмотки, Ом:									
25 °С	0,123	0,126	0,111	0,174	0,179	0,163	0,110	0,112	0,098
40 °С	0,131	-	-	0,185	-	-	0,116	-	-
75 °С	0,147	0,151	-	0,208	0,213	-	0,131	0,133	-
Погрешность коэффициента преобразования, %:									
1% $I_н$	-	-	-	-	-	-	-0,06	-0,06	-0,05
5% $I_н$	-0,35	-0,42	-0,45	-	-	-	-0,06	-0,06	-0,06
20% $I_н$	-0,21	-0,22	-0,24	-	-	-	-0,06	-0,05	-0,04
100% $I_н$	-0,09	-0,09	-0,13	-0,37	-0,32	-0,41	-0,04	-0,04	-0,03
120% $I_н$	-0,08	-0,08	+0,09	-	-	-	-0,04	-0,03	-0,04
Угловая погрешность, мин:									
1% $I_н$	-	-	-	-	-	-	3,7	3,5	4,0
5% $I_н$	14,9	11,6	13,0	-	-	-	3,1	2,9	3,0
20% $I_н$	7,7	6,8	8,0	-	-	-	1,6	1,5	2,0
100% $I_н$	3,3	3,4	3,0	4,9	3,7	5	0,3	0,4	1,0
120% $I_н$	2,8	2,9	3,0	-	-	-	0,3	0,4	1,0
Витковый коэффициент	19,956	19,957	-	19,997	20,003	-	20,001	20,001	-
Погрешность по виткам вторичной обмотки, %	-0,22	-0,22	-	-0,02	0,01	-	-0,006	0,003	-

Таблица 3. Результаты расчёта времени до насыщения магнитопровода ТТ типа ТЛК в соответствии с ГОСТ 58669-2019 (трехфазное КЗ, 1000 А, T_a – 30 мс)

Величина $B_{нас}$, о.е.	Рассчитанное время до насыщения			Минимально необходимое время до насыщения для УРЗА, мс	Результат проверки
	Аналитический метод по паспортным данным, мс	Графо-аналитический метод по паспортным данным, мс	Результаты расчёта графо-аналитическим методом по ВАХ, мс		
0,0	6,37 (Метод неприменим)	8,8	9,4	5	Соответствует
0,86	-1,87 (Метод неприменим)	2,8	3		Не соответствует
0,36	2,64 (Метод неприменим)	6,6	7		Соответствует

трансформатор ТЛК не проходит проверку, и даже если снизить сопротивление подключённой нагрузки за счёт увеличения сечения кабелей, все равно не удастся достичь необходимого результата. В соответствии с ГОСТ 58669-2019 такой ТТ должен был быть заменён. Но если при расчетах учесть реальное предельное значение остаточной магнитной индукции обмотки №2 (класс 10Р), у которой $B_{нас}$ = 0,36, полученное посредством анализатора, то этот ТТ успешно проходит проверку.

Выводы

В связи с ужесточением требований к работе ТТ РЗА в переходных режимах с целью обеспечения ими времени до насыщения при КЗ установлено, что исследования для принятия решения о пригодности к дальнейшей эксплуатации ТТ целесообразно проводить с использованием специализированных средств измерения и анализа параметров ТТ. Анализаторы ТТ РСТ200 и CT Analyzer могут использоваться при первичной и периодической проверке всех типов ТТ, что позволяет точнее и в более широком диапазоне определять их параметры, а также снизить влияние человеческого фактора на результаты измерений и полноту выполнения регламентных процедур.

Литература:

1. ГОСТ 8.217-2003. Государственная система обеспечения единства измерений. Трансформаторы тока. Методика поверки– М.: Стандартинформ. – 2008 г. – 15 с.
2. СТО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытаний электрооборудования. ПАО «Россети». – 2017 г. – 262 с.
3. СТО 34.01-4.1-005-2017. Правила технического обслуживания устройств релейной защиты, автоматики, дистанционного управления и сигнализации на объектах электросетевого комплекса. – ПАО «Россети». – 2017 г. – 158 с.
4. РД 153-34.0-35.301-2002. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения. – СЛУЖБА ПЕРЕДОВОГО ОПЫТА ОРГРЭС. – 2003 г. – 152 с.
5. Письмо Минэнерго № ЧА - 3440/10 от 02.04.2019 г. «О мерах по недопущению неправильной работы устройств релейной защиты».
6. ГОСТ Р 58669-2019. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях. – М.: Стандартинформ. – 2020 г. – 63 с.
7. IEC 60044-1:1996+AMD1:2000+AMD2:2002 CSV. Instrument transformers - Part 1: Current transformers. – 111 p.
8. IEC 60044-6 :1992. Instrument transformers - Part 6: Requirements for protective current transformers for transient performance. – 87 p.
9. IEC 61869-2:2012 Instrument transformers - Part 2: Additional requirements for current transformers. – 140 p.
10. Протокол совместного заседания секции «Управление режимами энергосистем, РЗиА», секции «Проблемы надежности и эффективности релейной защиты и средства автоматического системного управления в ЕЭС России» НП «НТС ЕЭС» и секции 3 НТС ПАО «Россети» «Управление режимами, автоматизации и применение автоматического управления в электрических сетях» по теме «Вопросы координации работы релейной защиты и измерительных трансформаторов тока». – Москва. – 11 сентября 2015 г. – 8 с.
11. Сивков А.С., Щеглов Л.В., Ведерников Г.А., Петрова О.В. Дополнительные параметры трансформаторов тока для обеспечения надежной работы сети // Энергоэксперт. – 2018. - №3. – С. 44-47.
12. IEC 61869-100:2017. Guidance for application of current transformers in power system protection. – 135 p.

12=3. Циглер Г. Цифровые устройства дифференциальной защиты – М.: Энергоиздат, 2005 – 273 с.

14. IEC 60255-121:2014. Measuring relays and protection equipment - Part 121: Functional requirements for distance protection. – 302 p.
15. Дегтярев А.А., Кужеков С.Л., Дони Н.А., Шурупов А.А., Федотов А.Ю. Анализ и проверка соответствия характеристик трансформаторов тока класса Р условиям функционирования первых ступеней дистанционных защит линий электропередачи при переходных процессах // Электрические станции. – 2020. - №3. – С. 43-53.
16. ПНСТ 283-2018. Трансформаторы измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока. – М.: Стандартинформ. – 2018. – 47 с.