

УДК 621.316:925

ЭЛЕКТРОННЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ. СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ВНЕДРЕНИЯ НА ОРУ 110–750 кВ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ

ГРЕЧУХИН В.Н., канд. тех. наук

Приведены материалы как по традиционным электромагнитным, так и по новым отечественным и зарубежным разработкам в области высоковольтных оптоэлектронных микропроцессорных трансформаторов тока и напряжения 110–750 кВ на разных принципах.

Ключевые слова: электромагнитные трансформаторы, оптоэлектронные датчики, погрешности.

ELECTRON CURRENT AND POTENTIAL TRANSFORMERS. THEIR STATE, DEVELOPMENT PERSPECTIVE AND INTRODUCTION ON OPY 110–750 KILOVOLT STATIONS AND SUB-STATIONS OF POWER NETWORK

V.N. GRECHUKHIN, Ph.D.

The work represents the materials of both traditional electromagnetic developing and new native and foreign ones in the field of high-voltage optoelectronic microprocessor current and 110-750 kilovolt potential transformers on different principles.

Key words: electromagnetic transformers, optoelectronic sensors, errors.

Введение. Традиционные трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН) применяются в энергетике на всех напряжениях от 6 кВ до 1150 кВ и обеспечивают на станциях и подстанциях информацию о первичном токе и первичном напряжении все системы управления и учета электроэнергии, такие как системы измерения, АСКУЭ, РЗА, ПА и диспетчеризации.

В настоящее время в энергетике при измерении первичных токов и напряжений используются преимущественно электромагнитные трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН), которые реализуют закон электромагнитной индукции (2-е уравнение Максвелла)

$$\oint_{l} \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \oint_{s} \vec{B} d\vec{S}, \quad (1)$$

а также емкостные трансформаторы напряжения. Емкостные трансформаторы напряжения содержат емкостный делитель напряжения и тот же электромагнитный ТН, но с меньшим (на коэффициент делителя) первичным напряжением.

Трансформаторы тока и напряжения. Конструкции, метрологические характеристики, достоинства и недостатки, причины выхода из строя. Среди требований, предъявляемых к высоковольтным трансформаторам тока и напряжения, выделим главные:

- электробезопасность персонала и вторичных цепей всех систем на щите управления станцией или подстанцией, т.е. обеспечение высоковольтной изоляции между первичными и вторичными цепями ТТ и ТН;
- точность измерения первичного тока и напряжения (обычно для различных потребителей вторичных токов и напряжений точность разная).

Эти требования определяют конструкции электромагнитных ТТ и ТН.

На ОРУ 110, 220, 330, 500 кВ используются три типовые конструкции трансформаторов тока, которые различаются способом обеспечения высоковольтной изоляции (рис. 1).

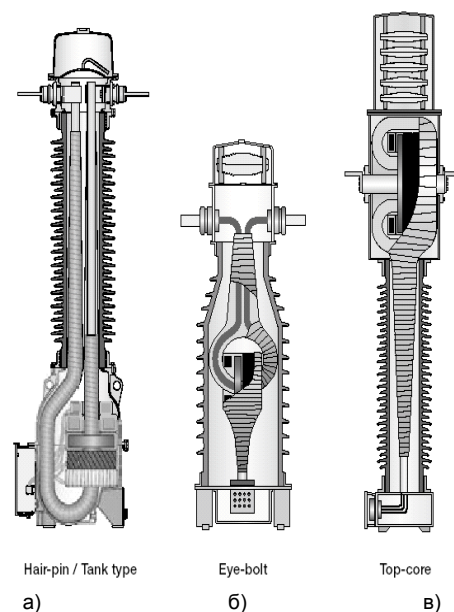


Рис. 1. Конструкции электромагнитных трансформаторов тока на напряжение 110–220 кВ (систематизация концерн АBB): а – с нижним расположением магнитопровода; б – с расположением магнитопровода в средней части изолятора; в – с верхним расположением магнитопровода

В ТТ с нижним расположением магнитопровода (рис. 1,а) главная изоляция располагается на первичном проводе; постепенно наращиваясь, она достигает максимума при прохождении первичного

провода через магнитопроводы со вторичными обмотками. В ТТ с расположением магнитопровода в средней части изоляции (рис. 1,б) главная изоляция разделена между первичной и вторичной обмотками, а в ТТ с верхним расположением магнитопровода (рис. 1,в) главная изоляция целиком отнесена на вторичную обмотку ТТ.

На напряжение 750, 1150 кВ, а в старых разработках и на 500 кВ применяются каскадные конструкции ТТ, грубо говоря, это два-три (четыре) ТТ (рис. 1), поставленные друг на друга, т.к. в одном каскаде не удастся обеспечить высоковольтную изоляцию на эти напряжения.

Как правило, в ТТ используют 1–2 магнитопровода (бушинга) для измерений и 3–4 магнитопровода большего сечения для релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА).

Первичными зажимами Л1 и Л2 ТТ включается в расщелку провода ЛЭП и, как правило, шунтируется разрядником на 10 кВ. Вторичный ток в стандарте 1А или 5А со вторичных зажимов И1, И2 от соответствующего бушинга доставляется кабелем на щит управления и проводится шлейфом через необходимые устройства измерений, АСКУЭ или РЗ и А.

Погрешности ТТ регламентируются ГОСТ 7746-2001 и МЭК 60044-1 (табл. 1), причем по классу точности 0,1 изготавливаются, в основном, лабораторные ТТ.

ТТ с измерительными обмотками по классу точности 0,2–0,5 широко распространены в энергетике на ОРУ станций и подстанций 6–750 кВ, а измерительные обмотки новых ТТ должны соответствовать классу точности 0,2s (0,5s). Выходы ТТ для подключения устройств РЗ и А должны обеспечивать класс точности 5Р (10Р).

Стандарт МЭК 60044-1 (табл. 1) предъявляет к ТТ по классам точности 0,2s (0,5s) существенно более жесткие требования по линейности, особенно в диапазоне малых токов. Требования стандарта по токовой погрешности, как правило, выполняются при использовании на вторичной обмотке витковой коррекции. Простых способов улучшения угловой погрешности ТТ нет; для соответствия стандарту по угловой погрешности нужен, как правило, лучший магнитный материал с узкой петлей гистерезиса (малыми потерями). Специалистам известен способ улучшения угловой погрешности путем использования до 8-ми дополнительных вторичных обмоток разного сечения, намотанных в разных частях магнитопровода, включенных по сложной схеме для коррекции токовой и угловой погрешности ТТ. Этот эмпирический способ использует поля рассеяния трансформатора, но теоретической основы под собой в настоящий момент не имеет.

Высоковольтные трансформаторы тока имеют следующие достоинства и недостатки.

Достоинства:

1. Высокий класс точности – 0,2–0,5 %. В лабораторных ТТ, где нет высоковольтной изоляции, достигим класс точности 0,1% и выше.

2. Простота и надежность ТТ в сетях 6–10–35 кВ.

3. Температурная стабильность характеристик ТТ.

Таблица 1

Класс точности	Диапазон первичного тока, %	Пределы ошибки			Применение
		первичный ток, %	Токовая погрешность, %	Угловая погрешность, мин	
0,1	25-100%	5	0,4	15	Лабораторные ТТ
		20	0,20	8	
		100	0,1	5	
		120	0,1	5	
0,2	25-100% <15 ВА	5	0,75	30	Прецизионные измерения
		20	0,35	15	
		100	0,2	10	
		120	0,2	10	
0,2s	25-100% <15 ВА	1	0,75	30	Прецизионные измерения
		5	0,35	15	
		20	0,2	10	
		100	0,2	10	
0,5	25-100%	5	1,5	90	Стандартные измерения
		20	0,75	45	
		100	0,5	30	
		120	0,5	30	
0,5s	25-100%	1	1,5	90	Прецизионные измерения
		5	0,75	45	
		20	0,5	30	
		100	0,5	30	
1,0	25-100%	5	3,0	180	Технические измерения
		20	1,5	90	
		100	1,0	60	
		120	1,0	60	
3,0	25-100%	50	3,0	-	Приборы
		120	3,0	-	
5,0	25-100%	50	5,0	-	Приборы
		120	5,0	-	
5Р, 5PR	100%	100	1,0	60	Защита
10Р, 10PR	100%	100	3,0		Защита
PX		-	-	-	Защита

Недостатки:

1. Насыщение магнитопровода электромагнитного ТТ апериодической составляющей тока короткого замыкания (КЗ) и отсутствие передачи информации о первичном токе в первые периоды аварийного переходного процесса, когда эта информация наиболее необходима системам РЗА и ПА для успешной локализации и ликвидации ава-

рии (погрешности трансформации тока электромагнитными ТТ достигают в этом режиме 90 %).

2. Проблемы с высоковольтной изоляцией, на что указывает неблагоприятная статистика аварий трансформаторов тока класса 110–750 кВ на электростанциях и подстанциях РАО ЕЭС России и Минатома в последние годы.

3. Взрыво- и пожароопасность трансформаторов тока существующих конструкций (рис. 1) принципиально неустранима, по нашему мнению, не только в маслонаполненных трансформаторах тока. В элегазовых ТТ взрыв также неизбежен при пробое главной изоляции, только разве что без пожара.

Ввиду важности первого недостатка электромагнитного ТТ остановимся на нем подробнее.

Ток короткого замыкания как аварийный режим может быть в одной из фаз линии периодическим и содержать аperiodическую составляющую (рис. 2) хотя бы в одной из двух других фаз.

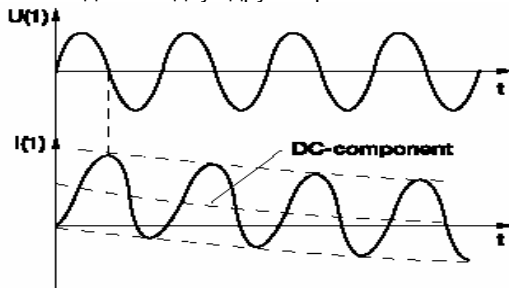


Figure 3.1
DC component

Рис. 2. Осциллограмма первичного тока короткого замыкания с периодической и аperiodической составляющей, затухающей по экспоненте (по материалам фирмы ABB)

Аperiodическая составляющая затухает по экспоненте с постоянной времени, определяемой мощностью энергосистемы и реактансом до места аварии. Эту составляющую приближенно можно трактовать как постоянный ток, принимая во внимание мощность и постоянную времени энергосистемы России.

Изменение потокосцепления в магнитопроводе трансформатора тока при наличии аperiodической составляющей в первичном токе короткого замыкания (рис. 3) неизбежно приводит к насыщению магнитопровода ТТ.

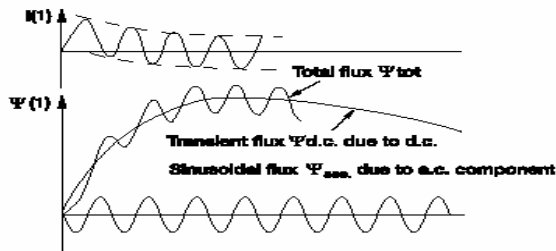


Figure 3.2
Effect of d.c. component of primary fault current on flux demands of a current transformer core

Рис. 3. Осциллограмма потокосцепления в магнитопроводе трансформатора тока при протекании первичного тока короткого замыкания с аperiodической составляющей, затухающей по экспоненте (по материалам фирмы ABB)

А насыщение магнитопровода приводит, в свою очередь, к несимметричному искажению формы кривой вторичного тока трансформатора тока, в то время как при периодическом первичном токе короткого замыкания искажения вторичного тока симметричные (рис. 4).

Несимметричное искажение формы кривой вторичного тока ТТ (рис. 4) под действием аperiodической составляющей в первичном токе КЗ имеет три важных следствия:

1. Информация о первичном токе фактически перестает поступать по вторичным цепям на системы РЗА и ПА через 10 миллисекунд после начала аварии, причем сильно искажена не только аperiodическая составляющая тока КЗ, но и периодическая тоже, примерно на 90% во втором периоде (через 5–10 периодов (100–200 миллисекунд) трансформация первичного тока восстановится).

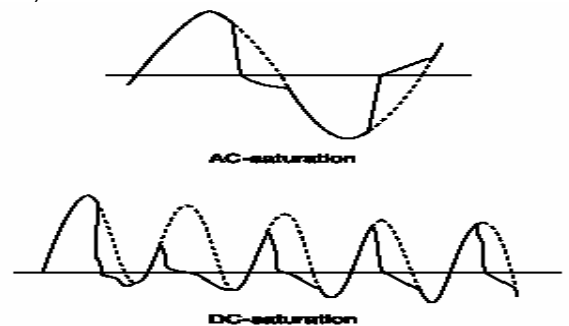


Figure 3.3
Distortion in secondary current due to saturation

Рис. 4. Осциллограммы вторичного тока трансформатора тока: а – при периодическом токе короткого замыкания; б – при наличии в первичном токе аperiodической составляющей тока КЗ (по материалам фирмы ABB)

2. Информация о первичных процессах фактически отсутствует или сильно искажена. В этих условиях системы защиты (и микропроцессорные и старые) либо не работают, либо работают ложно, либо просто затягивают процесс до появления информации, хотя по регламенту системы РЗА должны за один–два периода определять место аварии и выдавать команды на соответствующие высоковольтные выключатели для локализации и ликвидации аварии в начальной стадии.

3. Затягивание ликвидации аварии чревато выпадением из синхронизма крупных электрических двигателей и генераторов на заводах и электростанциях, что превращает простую аварию в системную.

Поскольку насыщение магнитопровода ТТ аperiodической составляющей тока КЗ вытекает из физического принципа действия трансформатора (постоянный ток не трансформируется), этот недостаток исправлен быть не может.

Рассмотрим особенности выполнения высоковольтной изоляции электромагнитного ТТ.

Дело в том, что пробой главной изоляции как финальная стадия развития аварии сопровождается однофазным коротким замыканием, при котором

вся мощь энергосистемы через малый реактанс прикладывается к месту пробоя.

В месте пробоя изоляции внутри ТТ выделяется огромная энергия в малое время, т.е. взрыв. В ТТ первичный провод достаточно большого сечения проходит через заземленные магнитопроводы или через магнитопроводы с заземленными вторичными обмотками и нет средств ограничения тока КЗ.

Финальной стадии (пробоем изоляции) предшествует достаточно длительный процесс ухудшения изоляции по разным причинам. Это старение изоляции, заводские скрытые дефекты, потеря герметичности, набор влаги и т.д.

Можно высказать гипотезу о еще одной возможной причине ухудшения главной изоляции, связанной с волновыми процессами в ЛЭП. Коммутационная или грозовая волна тока и напряжения, двигаясь вдоль ЛЭП с однородными волновыми параметрами, постепенно затухает. Но набегая на ТТ как существенную неоднородность волна напряжения возрастает и, прикладываясь к первичным зажимам ТТ (Л1, Л2), с одной стороны, вызывает пробой разрядника, а с другой стороны, ухудшение изоляции вдоль первичного провода ТТ (между жазимами Л1, Л2). А это ведет к постепенной деградации главной изоляции ТТ.

Тенденции в электроэнергетике России в настоящее время таковы, что наряду с существующими традиционными системами релейной защиты, противоаварийной автоматики, измерений и учета на станциях и подстанциях внедряются цифровые (микропроцессорные) системы РЗА, ПА, АСКУЭ, измерения и диспетчеризации. А это приводит к росту нагрузки на трансформаторы тока и вследствие этого к ухудшению класса точности ТТ, эксплуатируемых в энергетике России.

Экономические условия функционирования энергопредприятий и энергосистем таковы, что необходимо повысить точность учета электроэнергии, и цифровые (микропроцессорные) системы позволяют это сделать, однако недостаточно высокий класс точности ТТ является тормозом на этом пути.

Перед заводскими конструкторами ставится задача разработать ТТ более высокого класса точности с большей нагрузочной способностью. Удовлетворение этих требований неизбежно приведет либо к росту массогабаритных показателей (больше железа, больше меди и всего остального), что нежелательно по условиям конкуренции, либо к более напряженному использованию высоковольтной изоляции, что, в принципе, снижает надежность и срок службы ТТ, но по законам теории вероятности.

Высоковольтные трансформаторы напряжения 110–750 кВ, эксплуатируемые в России, бывают двух типов: электромагнитные и емкостные. Электромагнитные ТН (рис. 5) просты по принципу действия и содержат на магнитопроводе первичную обмотку с главной высоковольтной изоляцией и вторичную обмотку.

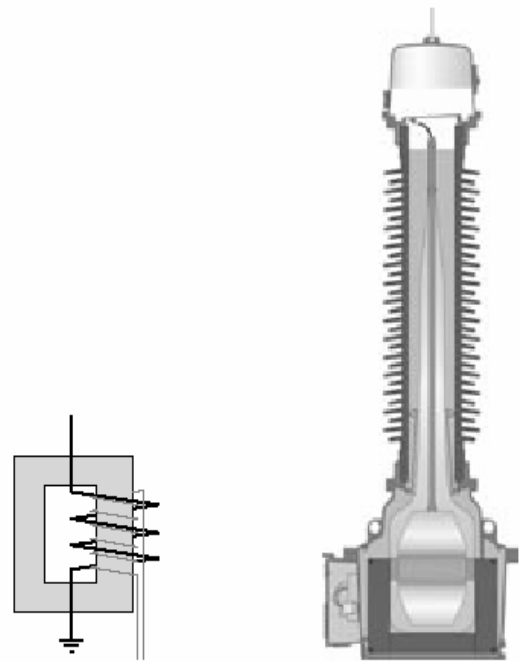


Figure 6.1
Inductive voltage transformer

Рис. 5. Принцип действия и конструкция электромагнитного трансформатора напряжения (по материалам концерна АBB)

Емкостные трансформаторы напряжения 110–750 кВ (рис. 6) содержат емкостный делитель напряжения и электромагнитное устройство, а по существу электромагнитный ТН на сниженное напряжение (6–35 кВ), подключенный к конденсатору нижнего плеча делителя напряжения. Обычно емкостные ТН используются также для ВЧ связи по ЛЭП.

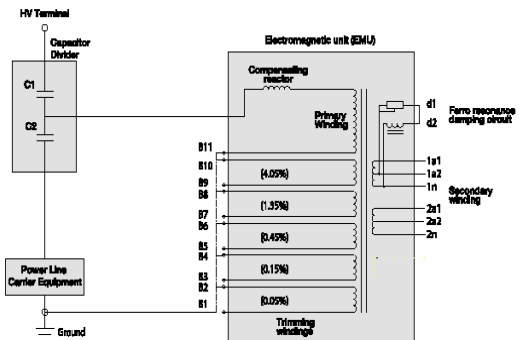


Figure 7.1
Principle diagram for a capacitor voltage transformer

Рис. 6. Принцип действия и конструкция емкостного трансформатора напряжения (по материалам концерна АBB)

Следует отметить, что индуктивность электромагнитного ТН со стороны первичных зажимов значительно больше активного сопротивления, име-

ет нелинейный характер в соответствии с петлей гистерезиса, т.е. зависит от режима и, взаимодействуя с емкостями элементов ОРУ и линий, может вызвать феррорезонанс со значительным повышением напряжения на ТН, что неизбежно приведет к аварии ТН.

Анализ протоколов технологических нарушений в работе электромагнитных ТН 110–750 кВ показывает, что основной причиной пробоя главной изоляции ТН являются феррорезонансные явления, сопровождающиеся внутренними перенапряжениями на первичной обмотке ТН (примерно 90% случаев). Другими причинами является заводской брак, чаще всего потеря герметичности, течь масла, а также недостатки эксплуатации.

Оптоэлектронные датчики тока и напряжения (преобразователи тока и напряжения) 110–750 кВ. Известные недостатки ТТ и ТН привели к интенсивным научно-исследовательским работам с целью создания взрывобезопасных, высоковольтных, с лучшими метрологическими характеристиками датчиков информации о первичном токе и напряжении для использования на ОРУ станций и подстанций энергосистем.

Поиск альтернативного технического решения измерения тока и напряжения в высоковольтных электроэнергетических установках ведется давно как в СССР, России, так и за рубежом.

Эти исследования стали более актуальными в связи с интенсивным процессом внедрения микропроцессоров в системы управления, измерения, релейной защиты, противоаварийной автоматики, телемеханики на подстанциях.

Оптоэлектронные ТТ и ТН 110–750 кВ функционируют на основе 2-х физических принципов:

- поворот вектора поляризации светового потока под действием магнитного поля (эффект Фарадея), который можно использовать для измерения тока:

$$\theta = V \int \vec{B} d\vec{l} = \mu V \int \vec{H} d\vec{l} = \mu VNI, \quad (2)$$

где V – постоянная [As^2/kgm] (Verdet constant);

- поворот вектора поляризации светового потока под действием электрического поля (электрооптический эффект Погкельса), который можно использовать для измерения напряжения.

Теоретические разработки оптоэлектронных ТТ и ТН велись в России (СССР) исторически раньше, чем за рубежом, в разных организациях (ОРГРЕС, МЭИ, ИЭИ, ВЭИ, НИИПТ, Институт электродинамики АН Украины и т.д.), при скудном финансировании, усилиями энтузиастов.

За рубежом этими исследованиями занимаются ведущие электротехнические фирмы (ABB, Siemens, Nxpaha и др.), вкладываются значительные средства и к настоящему времени достигнут прогресс в использовании эффекта Фарадея для измерения тока в высоковольтном проводе и электрооптического эффекта Погкельса для измерения высокого напряжения.

Фирмами ABB, Siemens, Nxpaha выполнены опытные образцы (рис. 7, 8, 9) оптоэлектронных датчиков тока и напряжения (ОЭДТ, ОЭДН) на классы напряжения 110–750 кВ.



OMU Optical Metering Unit

Рис. 7. Оптоэлектронный датчик тока и напряжения фирмы ABB

ОЭДТ и ОЭДН (рис. 9) установлены в опытную эксплуатацию на подстанциях США и Канады.

Среди технических характеристик ОЭДТ и ОЭДН (рис. 7) отметим номинальный ток 2000 А и метрологические характеристики: класс точности токового выхода 0,2 и класс точности выхода по напряжению 0,2.

Исследования продолжают в целях выполнения следующих задач:

- повышение точности;
- улучшение температурной и временной стабильности;
- подавление чувствительности к вибрации;
- обеспечение трансформации аperiodической составляющей тока КЗ.

Датчик тока фирмы SIEMENS AG Corporate (рис. 8) вместе с электронным блоком обработки содержит монолитную оптоэлектронную конструкцию вместе с токопроводом, обычно закрепленную в верхней части высоковольтного изолятора (в верхнем фланце), оптоволокну и блок обработки [2].



Рис. 8. Датчик тока фирмы SIEMENS AG Corporate



Рис. 9. Оптический датчик тока и напряжения фирмы Nxphase

Очевидно, что этот макет должен быть дополнен высоковольтным изолятором с проходящими внутри него оптоволоконными и прочими элементами законченного изделия.

Недостатком оптоэлектронных датчиков тока [2] является зависимость поворота вектора поляризации света от вибрации, которая сильнее, чем эффект Фарадея или эффект Поггеля. В выходном сигнале отличить полезный сигнал, пропорциональный току, от сигнала, пропорционального вибрации, невозможно.

Фирмой SIEMENS предложены методы компенсации этого вредного эффекта в оптической части первичного датчика [2].

Из технических характеристик оптоэлектронных датчиков тока и напряжения фирмы Nxphase (табл. 2) следует отметить особенность аналоговых выходных сигналов датчиков, а именно, наличие двух систем: «низкоэнергетический аналоговый интерфейс» и «высокоэнергетический аналоговый интерфейс».

В первом случае датчик тока имеет выход для измерений 4 В, а для защиты принят выход 0,2 В, что неявно дает кратность 20.

Во втором случае датчик тока имеет выход для измерений 1 А с нагрузкой 2,5 ВА, а аналоговый выход для защиты отсутствует.

Таблица 2

Параметры	Датчик напряжения	Датчик тока
Низкоэнергетический аналоговый интерфейс	4 V для измерений 4 V для защиты	4 V для измерений 200 mV для защиты
Динамический диапазон	<0.2% ошибки от 50% до 200% U_n <3% ошибки от 2% U_n	Разная кратность для каждого номинального тока
Частотный диапазон	0.5 Hz to 6 kHz	0.5 Hz to 6 kHz
Высокоэнергетический аналоговый интерфейс	69 V, 115 V 120 V при нагрузке 2.5 VA с $\cos \varphi = 0.9$	1 A при нагрузке 2.5 VA с $\cos \varphi = 0.9$
Погрешность	<0.2% ошибки от 50% до 120% U_n	<0.2% ошибки от 1 A до 3000 A

Погрешности измерения тока короткого замыкания с аperiodической составляющей оптоэлектронными датчиками тока достаточно велики (рис. 10, 11). Эти погрешности обусловлены [3] использованием «неоптимизированного» датчика тока, они не приемлемы для систем РЗА. Вероятно, происходит «опрокидывание» фазы вектора поляризации света, что хорошо заметно (рис. 11) по сравнению с сигналом шунта.

Оптимизированный оптоэлектронный датчик тока (рис. 12) дает для систем РЗА в тех же условиях приемлемые по точности результаты.

Очевидно, что оптимизированный для РЗА датчик тока должен содержать в первичном датчиковом узле меньшее число витков оптоволоконного провода по сравнению с датчиком тока для измерений. Из этого следует необходимость установки двух датчиковых узлов, двойного комплекта оптоволоконного, электроники, то есть практически удвоение материалозатрат и стоимости.

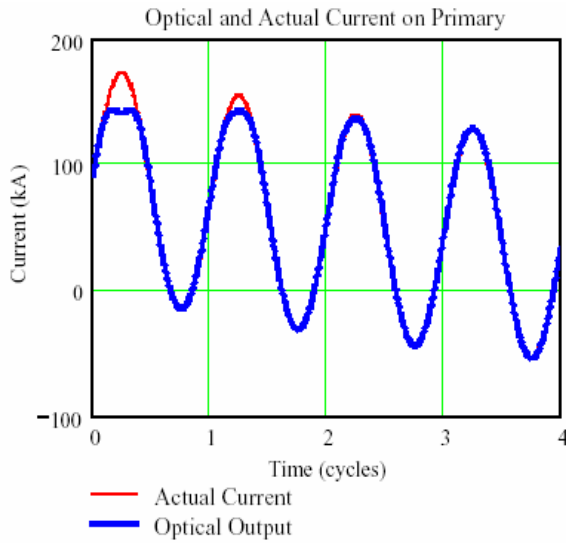


Рис. 10. Осциллограмма трансформации тока КЗ с апериодической неоптимизированным оптическим датчиком тока

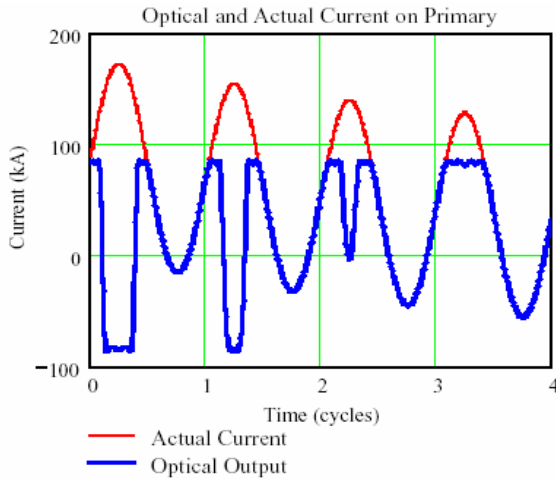


Рис. 11. Осциллограмма (2) трансформации тока КЗ с апериодической неоптимизированным оптическим датчиком тока

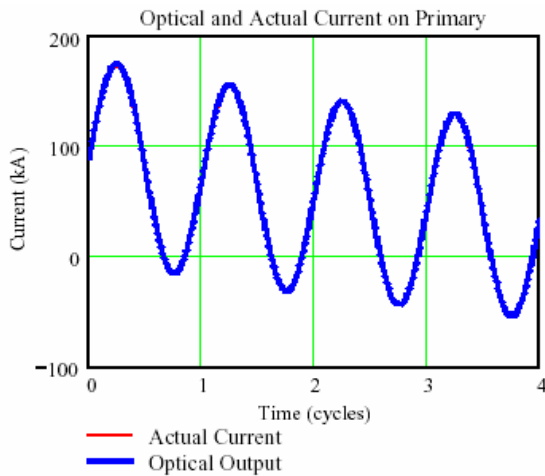


Рис. 12. Осциллограмма (3) трансформации тока КЗ с апериодической оптимизированным оптическим датчиком тока

Цифровые трансформаторы тока и напряжения 110–750 кВ на основе прямого использования первого и второго уравнений Максвелла. Высоковольтные цифровые трансформаторы тока (ЦТТ) и напряжения (ЦТН) разработаны в целях:

- повышения точности измерения первичного тока и напряжения в электроустановках с напряжением 110–750 кВ;
- создания взрывобезопасных высоковольтных измерительных систем с улучшенной, более надежной высоковольтной изоляцией;
- выдачи цифровой информации внедряемым на станциях и подстанциях энергосистем цифровым системам измерения, защиты и управления;
- полноценной замены существующих ТТ и ТН, с выводом информации также и в аналоговой форме (1 А, 5 А, 100 В, $100 / \sqrt{3}$ В).

Образец ЦТТ реализует несколько принципов измерения тока непосредственно на высоком потенциале с помощью аналого-цифрового преобразователя, микропроцессора и другой электроники. Передача цифровой информации с высокого потенциала на потенциал земли осуществляется по оптоволокну.

Техническое решение по созданию ЦТТ 110–750 кВ базируется на использовании классического электромагнитного трансформатора тока (ТТ), освобожденного от необходимости обеспечения высоковольтной изоляции. Вторичная обмотка ТТ нагружена на шунт, аналого-цифровой преобразователь и соединена с первичным проводом, при этом принципиально важно, что изоляцию и передачу информации обеспечивает оптоволокну. В этих условиях ТТ обеспечивает наилучшую точность и стабильность характеристик. А недостаток ТТ, связанный с насыщением магнитопровода апериодической составляющей тока КЗ, компенсируется применением магнитотранзисторного преобразователя тока, реализующего закон полного тока (первое уравнение Максвелла) и трансформирующего как переменный, так и постоянный ток.

Экспериментальный образец был испытан, а после доработки программного обеспечения встроенного микропроцессора был испытан повторно. Выполнено 4 серии опытов: 2 серии (по 8 опытов в каждой) токами от 10% до 120% номинального тока (по ГОСТу) и 2 серии (по 8 опытов в каждой) токами короткого замыкания до 40 кА с апериодической составляющей. Испытания показали, что достигнута, как отмечено в протоколах, высокая точность измерительного канала (0,2–0,5%) и трансформация всего спектра тока короткого замыкания, включая апериодическую составляющую, релейным каналом экспериментального образца.

График токовой погрешности магнитотранзисторного преобразователя (рис. 13) располагается внутри нормированных кривых в соответствии с ГОСТом на класс точности 0,2%, а график токовой погрешности ТТ располагается внутри нормированных кривых в соответствии с ГОСТом на класс точности 0,5%.

Графики угловой погрешности МТ и ТТ (рис. 14) демонстрируют ту же тенденцию.

Очевидно, что для значительного улучшения точностных характеристики ТТ необходимо использовать аморфный (нанокристаллический) сплав.

Погрешности измерения тока короткого замыкания с аperiodической составляющей магнитотранзисторным преобразователем (рис. 15), по сравнению с сигналом шунта, невелики (меньше 3%), соответствуют ГОСТу по классу Р с запасом.

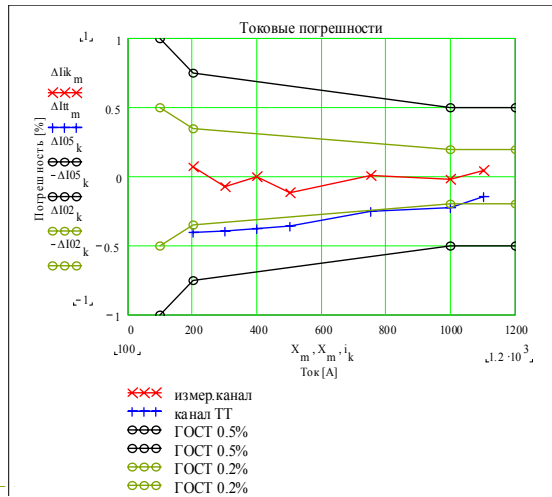


Рис. 13. Токовые погрешности магнитотранзисторного преобразователя (кресты) и ТТ (плюсы) вместе с нормированными кривыми по ГОСТу на классы 0,2 и 0,5

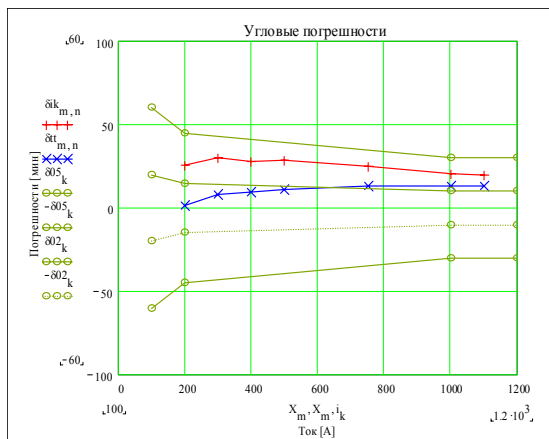


Рис. 14. Угловые погрешности магнитотранзисторного преобразователя (кресты) и ТТ (плюсы) вместе с нормированными кривыми по ГОСТу на классы 0,2 и 0,5

На базе проведенной разработки перспективным является (рис. 16) создание нового класса высоковольтного энергетического оборудования – цифровых трансформаторов тока для ОРУ 220 кВ (110–750 кВ) станций и подстанций энергосистем.

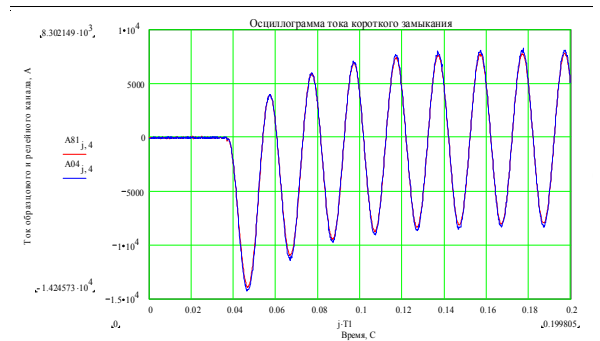


Рис. 15. Осциллограмма трансформации тока короткого замыкания с аperiodической составляющей 14,2 кА каналом для релейной защиты по сравнению с сигналом шунта

Новый класс высоковольтного энергетического оборудования: микропроцессорные трансформаторы тока и напряжения 110-750 кВ с аналоговыми и цифровыми выходами для измерений, АСКУЭ, РЗ и А

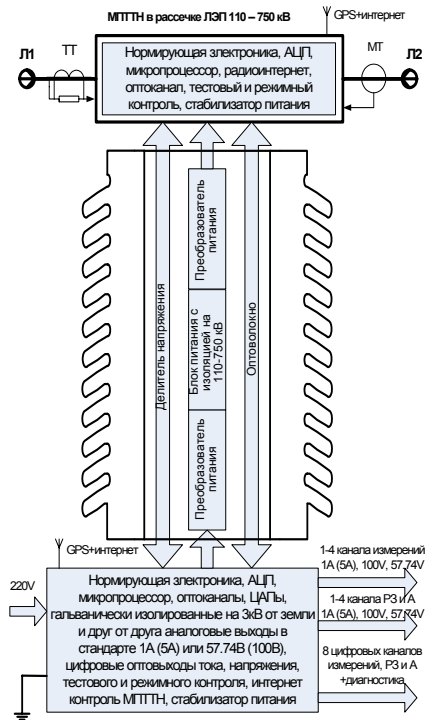


Рис. 16. Блок-схема микропроцессорного трансформатора тока и напряжения

Преимущества ЦТТ:

- взрывобезопасность (даже при внутреннем повреждении высоковольтной изоляции взрыва и пожара не произойдет, в отличие от существующих ТТ 110–750 кВ);
- сухая внутренняя высоковольтная изоляция и вандалоустойчивая внешняя изоляция из силиконовой резины;
- высокий класс точности (лучше, чем 0,2s для систем измерений и АСКУЭ, за счет использо-

вания магнитопровода из аморфного магнитного материала);

- передача информации и высоковольтная изоляция между микропроцессорами верхнего и нижнего фланцев по оптоволокну;

- передача без искажений всей информации в режимах короткого замыкания, включая апериодическую составляющую тока КЗ для систем РЗА с магнитотранзисторного кольца (не происходит насыщения магнитопровода, в отличие от стандартных ТТ);

- кроме стандартных аналоговых выходов 1 А (5 А) с микропроцессоров ЦТТ информация о первичных токах доставляется на щит управления в цифровой форме по оптоволокну;

- встроенная диагностика и тестовый контроль на компьютере метролога (релейщика);

- позиционирование, точное время по системе GPS со встроенным интернетом (как дополнительная опция);

- вес до 85 кг, что в 5–7 раз легче существующих ТТ.

Испытания показали правильную трансформацию всего спектра частот тока короткого замыкания каналом для защиты, включая апериодическую со-

ставляющую (постоянный ток) и высокий класс точности канала для измерений.

В заключение отметим перспективность разработок цифровых трансформаторов тока и напряжения и их использования вместе с микропроцессорными устройствами измерений, АСКУЭ, РЗА и систем технологического управления на подстанциях с перспективой перехода к «цифровой» подстанции, где все информационные потоки циркулируют и обрабатываются в цифре.

Список литературы

1. Сайт фирмы ABB.

2. **M. Wilsch, P. Menke, T. Bosselmann.** Magneto-Optic Current Transformers for Applications in Power Industry SIEMENS AG Corporate Research and Development ZFE T EP 5, POB 3220, D-91050 Erlangen

3. **J. D. P. Hrabliuk.** Optical Current Sensors Eliminate CT Saturation.

4. **Гречухин В.И.** Анализ результатов испытаний цифрового трансформатора тока // Электр. – 2001. – № 3. – С. 42–45.

Гречухин Владимир Николаевич,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии,

телефон (4932), 26-99-03,

e-mail: grech@eef.ispu.ru