



Федеральная таможенная служба России
Государственное казенное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Российская таможенная академия»
Владивостокский филиал

Г.Е. Кувшинов
Д.Б. Соловьёв

Современные направления развития
измерительных преобразователей тока
для релейной защиты и автоматики

Владивосток
2012

ББК 32.96-04
УДК 621.31
К 88



Рецензенты:

Б.Е. Дынькин, д-р тех. наук, проф.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения

Н.В. Савина, д-р тех. наук, проф., Амурский государственный университет

Кувшинов, Г.Е.

К 88 Современные направления развития измерительных преобразователей тока для релейной защиты и автоматики / Г.Е. Кувшинов, Д.Б. Соловьев ; Российская таможенная академия, Владивостокский филиал. — Владивосток: РИО Владивостокского филиала Российской таможенной академии, 2012. — 316 с.

ISBN 978-5-9590-0581-8

Рассмотрены особенности конструкции, передаточные функции и частотные характеристики трансформаторов тока и дифференцирующих измерительных преобразователей тока: катушек Роговского и трансреакторов, применение которых в устройствах для измерения переменных токов, а также для защиты и управления электротехническими комплексами, обеспечивает значительное сокращение массы, повышение точности и быстродействия. Основное внимание уделено инженерным методам расчёта параметров как предлагаемых конструкций катушек Роговского и трансреакторов, так и разработанных авторами устройств для восстановления формы тока (аналоговых и цифровых интегрирующих фильтров), для дифференциальной защиты и защиты электрооборудования от работы в несимметричных режимах. Приводятся примеры таких расчётов и результаты моделирования устройств защиты с помощью программы Micro-Cap.

Для научных и инженерно-технических работников, занятых разработкой, проектированием и наладкой устройств релейной защиты и автоматики, а также информационно-измерительных приборов для получения, измерения и исследования информации о токах в электротехнических комплексах и системах, а также студентов и магистрантов, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», аспирантов по специальностям, соответствующим этому направлению.

**ББК 32.96-04
УДК 621.31**

ISBN 978-5-9590-0581-8

© Владивостокский филиал
Российской таможенной академии, 2012
© Г.Е. Кувшинов, Д.Б. Соловьев, текст, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список основных обозначений	6
Введение	
1. Современное развитие измерительных преобразователей тока для релейной защиты и автоматики	8
2. Программы для анализа и моделирования измерительных преобразователей тока	20
3. О книге «Современные направления развития измерительных преобразователей тока для релейной защиты и автоматики»	22
<i>Литература</i>	23
 Часть 1. Измерительные преобразователи тока для токовой защиты и автоматики	
Глава 1. Трансформаторы тока	
1.1. Передаточные функции, частотные характеристики и статические погрешности измерения	27
1.2. Измерение переходных токов с помощью трансформатора тока с немагнитными зазорами в магнитопроводе	34
1.3. Моделирование нелинейного магнитного сердечника	37
1.4. Моделирование измерения переходных токов с помощью трансформатора тока с учётом насыщения и гистерезиса его магнитного сердечника	47
1.5. Недостатки трансформаторов тока	54
<i>Литература</i>	56
 Глава 2. Дифференцирующие индукционные преобразователи тока — катушки Роговского	
2.1. Принцип действия и разновидности дифференцирующих индукционных преобразователей тока	59
2.2. Взаимная индуктивность несекционированной тороидальной катушки Роговского и проводника с измеряемым током	71
2.3. Зависимость длины обмоточного провода от размеров тороидальной катушки Роговского	77
2.4. Взаимная индуктивность секционированной тороидальной катушки Роговского и проводника с измеряемым током	79
2.5. Взаимная индуктивность секционированной тороидальной катушки Роговского и мешающего прямолинейного проводника	87
2.6. Индуктивность секционированной тороидальной катушки Роговского...	90
2.7. Расчёт секционированной катушки Роговского	98
2.8. Катушки Роговского для защиты и автоматики электрооборудования низкого напряжения	
2.8.1. Катушки Роговского для измерения больших токов	104
2.8.2. Трансреакторы для измерения малых токов	113
2.9. Влияние внутреннего сопротивления дифференцирующего индукционного преобразователя тока на точность измерения производной тока	123
<i>Литература</i>	132

Часть 2. Интегрирующие фильтры для восстановления формы тока, измеряемого катушками Роговского

Глава 3. Аналоговые интегрирующие фильтры

3.1. Передаточные функции вторичного измерительного преобразователя и установившиеся ошибки измерения синусоидальных токов.....	137
3.2. Расчётный ток переходного режима	147
3.3. Функции аналогового интегрирующего фильтра первого порядка.....	150
3.4. Функции аналогового интегрирующего фильтра второго порядка с двукратными полюсами	159
3.5. Функции аналогового интегрирующего фильтра второго порядка с комплексно сопряжёнными и разными действительными полюсами.....	167
3.6. Функции аналоговых интегрирующих фильтров третьего и четвёртого порядка с кратными полюсами	170
3.7. Экспериментальное исследование дифференцирующего индукционного преобразователя тока с интегрирующим фильтром второго порядка	172
3.8. Переходный процесс в линии с измеряемым током при ненулевых начальных условиях	176
<i>Литература</i>	182

Глава 4. Цифровые интегрирующие фильтры и системы микропроцессорной токовой защиты

4.1. Синтез цифровых интегрирующих фильтров	185
4.2. Параметры и функции цифровых интегрирующих фильтров второго порядка	190
4.3. Применение микропроцессорных защитных терминалов	197
<i>Литература</i>	202

Часть 3. Применение дифференцирующих индукционных преобразователей тока в устройствах токовой защиты и автоматики без восстановления формы измеряемого тока

Глава 5. Устройства дифференциальной защиты

5.1. Недостатки применения трансформаторов тока в дифференциальной токовой защите	206
5.2. Дифференциальная защита шин с уравновешенными напряжениями...	214
5.3. Особенности дифференциальной защиты шин, выполненной на основе катушек Роговского	216
5.4. Моделирование дифференциальной защиты шин с катушками Роговского	223
5.5. Запаздывание срабатывания дифференциальной защиты шин при однофазном коротком замыкании	231
<i>Литература</i>	235

Глава 6. Назначение и разновидности устройств защиты от неполнофазных режимов работы

6.1. Анормальные режимы асинхронных двигателей	237
6.2. Защитные устройства с фильтрами напряжения и тока обратной последовательности	239

6.3. Разновидности измерительных преобразователей тока обратной последовательности, выполненных на основе дифференцирующих индукционных преобразователей тока	244
<i>Литература</i>	256

Глава 7. Параметры и характеристики измерительных преобразователей тока обратной последовательности

7.1. Особенности выбора параметров измерительных преобразователей тока, выполненных с применением катушек Роговского	258
7.2. Анализ измерительных преобразователей тока обратной последовательности при действии токов прямой, обратной и нулевой последовательностей	258
7.3. Расчётные мощности элементов измерительных преобразователей тока обратной последовательности	265
7.4. Сравнение суммарных расчётных мощностей элементов измерительных преобразователей тока обратной последовательности с двух- и пятиэлементными фильтрами напряжения обратной последовательности	270
<i>Литература</i>	272

Глава 8. Работа измерительных преобразователей тока обратной последовательности в переходных режимах и при измерении несинусоидальных токов

8.1. Переходные процессы в электротехнических комплексах	275
8.2. Переходные процессы в электрических цепях измерительного преобразователя обратного тока	277
8.3. Моделирование работы измерительного преобразователя тока обратной последовательности при несинусоидальных токах в защищаемой линии	
8.3.1. Форма токов тиристорных преобразователей и электродвижущая сила дифференцирующих индукционных преобразователей тока, измеряющих эти токи	284
8.3.2. Параметры моделирования работы выпрямителя на противоЭДС	285
8.3.3. Результаты моделирования измерительного преобразователя тока обратной последовательности, который защищает выпрямитель, работающий на противоЭДС	295
8.4. Фильтр для подавления высших гармоник в выходном напряжении фильтра напряжения обратной последовательности	299
8.5. Результаты моделирования работы измерительного преобразователя тока обратной последовательности, снабжённого индуктивно-ёмкостным фильтром	308
<i>Литература</i>	312

ВВЕДЕНИЕ

1. Современное развитие измерительных преобразователей тока для релейной защиты и автоматики

Трансформаторы тока, их недостатки

В состав разнообразных устройств токовой защиты, а также устройств автоматического распределения активных и реактивных нагрузок между включёнными на параллельную работу синхронными генераторами должны входить измерительные преобразователи тока (ИПТ). Более ста лет с этой целью используют трансформаторы тока (ТТ) [1–3]. Но в последние годы в электротехнике происходит развивающийся процесс замены ТТ другими ИПТ. Такая тенденция объясняется следующими недостатками ТТ [3, 4].

Во-первых, это большие размеры и масса ТТ: при напряжении выше 35 кВ ТТ становятся неоправданно дорогими и громоздкими. Даже встраиваемые в выключатели и силовые трансформаторы ТТ, обладающие наименьшей массой, по сравнению с другими разновидностями ТТ, при напряжении 220 кВ имеют массу около 150 кг [3]. Такая масса непомерно велика для ТТ, у которого номинальная мощность вторичной обмотки составляет всего 40 ВА. *Во-вторых*, при измерении больших токов, из-за нелинейности характеристики намагничивания сердечника ТТ, негативно проявляются такие эффекты, как насыщение этой характеристики, влияние остаточной намагничённости и апериодической составляющей измеряемого тока. При этом резко падает точность измерения, искажается форма тока вторичной обмотки ТТ.

Кроме того, если по первичной обмотке ТТ прошёл ток, содержащий апериодическую составляющую, превосходящую допустимый для ТТ ток предельной кратности, то в результате сильного насыщения сердечника возникает эффект его остаточного намагничивания. Последствие этого эффекта — многократное возрастание погрешности измерения, которая входит в норму более восьми часов при последующем токе до 20% от номинального значения (встречаются сведения о том, что это время может составлять сутки и более).

В-третьих, при размыкании вторичных цепей ТТ возникает опасное перенапряжение на зажимах вторичных обмоток.

В-четвёртых, из-за наличия трансформаторного масла или элегаза, ТТ обладают пониженной сейсмостойкостью.

В итоге, теперь, когда происходит переход от электромеханических реле к миниатюрным микропроцессорным, входная мощность которых значительно меньше указанного значения выходной мощности ТТ, и которые могут потреблять входной ток меньше одного миллиампера, применение ТТ становится всё более нежелательным. Сфера применения ТТ будет неуклонно сокращаться за счёт вытеснения их другими ИПТ.

Измерительные преобразователи тока на основе эффекта Холла

Достоинства: высокая точность, возможность измерять постоянную составляющую, миниатюрность — присущ ИПТ на основе эффекта Холла. Такие ИПТ находят широкое применение в силовой электронике и в системах управления электроприводами. Но применительно к высоковольтным цепям их основное достоинство — миниатюрность — исчезает: магнитный концентратор, в воздушный зазор которого помещается измерительный преобразователь напряжённости магнитного поля, созданного измеряемым током, должен иметь большой диаметр, чтобы обеспечивать необходимое расстояние концентратора от высоковольтного проводника с измеряемым током. Вторым недостатком ИПТ на основе эффекта Холла — это необходимость подключения указанного измерительного преобразователя к стабильному источнику постоянного тока [5–8].

Сейчас наблюдается развитие двух перспективных ИПТ: оптических трансформаторов тока и катушек Роговского.

Оптические трансформаторы тока

В высоковольтных оптических измерительных трансформаторах тока (ОТТ) и преобразователях тока (ОПТ) используется эффект Фарадея. Они стали использоваться для учета электроэнергии несколько лет назад. ОТТ/ОПТ имеют чувствительный элемент — токовую головку, состоящую из одного или нескольких витков оптического волокна, по которому проходит лазерный луч. Через окно токовой головки проходит проводник с измеряемым током i . Под действием магнитного поля тока i плоскость поляризации лазерного луча поворачивается на угол, пропорциональный произведению длины пути светового луча в среде оптического волокна вдоль силовой линии магнитного поля на напряжённость магнитного поля. Среднее по длине оптического волокна токовой головки значение напряжённости H определяется током i . Оптическое волокно токовой головки соединяется с электронно-оптическим блоком, электрический сигнал на выходе которого пропорционален измеряемому току i [9, 10].

ОПТ используют при измерении больших переменных или постоянных токов в электрометаллургической или электрохимической промышленности. Токовая головка ОТТ устанавливается на вершине изоляционной колонны, выполняющей функцию опоры шины с головкой. Внутри колонны проходит оптическое волокно. Все показатели ОТТ выше, чем у традиционных ТТ. В частности, ОТТ обеспечивают класс точности не хуже 0,25, с возможностью измерения до 100 гармоник. При напряжении 220 кВ масса ОТТ, выпускаемых канадской компанией *NxtPhase Corporation*, составляет 65 кг, а масса ТТ других производителей лежит в пределах от 900 до 1100 кг.

Недостаток ОТТ — повышенная сложность по сравнению с ТТ. Высока и стоимость ОТТ. В настоящее время затраты на организацию точки учёта электроэнергии с использованием ОТТ ниже, чем с применением ТТ, только при напряжениях, превышающих 110 кВ. При таких показателях следует ожидать неуклонное расширение применения ОТТ в системах учёта электроэнергии в сетях с напряжением не менее 110 кВ. Другой недостаток ОТТ — это