

На правах рукописи

Савиных Максим Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ИХ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Специальность 05.11.01 – Приборы и методы измерения
(измерения электрических и магнитных величин)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ)

Научные руководители:

Пасынков Юрий Алексеевич,

доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ

Трушин Виктор Александрович,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Зыков Дмитрий Дмитриевич,

кандидат технических наук, доцент, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, директор научно-образовательного центра «Нанотехнологии»

Кириянов Валерий Павлович,

доктор технических наук, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории интегрированных информационных систем управления

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», ОмГТУ

Защита состоится "16" октября 2018 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 на базе ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет", по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>.

Автореферат разослан "___" _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н., доцент



Е.А. Шевелева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основным источником погрешности счетчика электрической энергии является первичный преобразователь тока, поскольку он работает в широком динамическом диапазоне (до 400 и более); таким первичным преобразователем обычно является трансформатор тока. Требования к точности счетчиков постоянно растут, кроме этого существуют способы воздействия на трансформатор тока с целью кражи электроэнергии, приводящие к значительной отрицательной погрешности. Например, создание магнитного поля с помощью постоянного магнита. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов уменьшения погрешностей трансформаторов тока и повышения его устойчивости к воздействию постоянного магнитного поля. Перспективной в этом плане является схема активного трансформатора тока, в которой стандартный двухобмоточный трансформатор дополняется обмоткой и усилителем. За счет обратной связи погрешность такого устройства уменьшается по сравнению с погрешностью исходного трансформатора. При разработке и исследовании измерительных трансформаторов тока необходимо также производить оценку их погрешностей. Существующие методы определения токовой и угловой погрешностей требуют использования образцовых трансформатора тока и прибора сравнения, которые дороги, а также не позволяют определить погрешности трансформаторов тока с классом точности, соизмеримым с классом эталонного трансформатора. Поэтому актуальной задачей является разработка методов оценивания погрешностей трансформаторов тока без использования эталонного трансформатора тока и прибора сравнения. Перспективными являются методы косвенного оценивания максимальных погрешностей трансформаторов тока, основанные на измерении тока намагничивания.

Современные счетчики электроэнергии позволяют измерять множество параметров сети (электрическую энергию, мощность, ток, напряжение, фазовый сдвиг, частоту) и имеют высокий класс точности (1 и выше). Кроме этого, многие счетчики имеют ряд дополнительных функций: хранение и передачу данных, подключение/отключение абонента, детектирование внешних событий и др. Поэтому их производство является высокотехнологичным процессом. При серийном производстве требуется проводить контроль всех функций большого количества счетчиков и их метрологических характеристик (относительной погрешности измерения электрической энергии и других параметров сети). Многие из применяемого технологического оборудования является неавтоматизированным, поэтому выполнение операций технологического контроля является малопродуктивным и потенциально может привести к ошибкам первого и второго рода, поскольку решение об исправности проверяемого счетчика принимает оператор испытательного стенда. В связи с этим актуальной задачей является разработка комплексного системного решения для серийного производства, позволяющего проводить все проверки автоматизировано, с высокой производительностью, минимальным количеством сбоев технологического оборудования, фиксацией всех результатов в базе данных.

При производстве счетчики электроэнергии проходят испытания в разных условиях, отличающихся от нормальных. Все они приведены в ГОСТ Р 52322–

2005. В одном из таких испытаний определяется дополнительная погрешность счетчика в условиях наличия постоянной составляющей и четных гармоник в цепи тока. Необходимость такой проверки вызвана способом кражи электроэнергии с помощью диода, включаемого последовательно с нагрузкой, который создает постоянную составляющую в сигнале тока, что приводит к насыщению магнитопровода трансформатора тока и появлению отрицательной токовой погрешности. Рекомендованная в ГОСТ Р 52322–2005 испытательная схема имеет потенциальную погрешность результатов испытания, связанную с неидентичностью диодов, задающих ток в испытательной схеме. Это может привести к ошибке первого или второго рода при испытании счетчика. Поэтому существует необходимость разработки метода, нечувствительного к разбросу параметров диодов и позволяющего получать достоверные результаты испытания.

Целью диссертационной работы является повышение точности счетчиков электроэнергии за счет разработки более точной и устойчивой к воздействию постоянного магнитного поля цепи измерения тока, а также повышение производительности технологического контроля при серийном производстве счетчиков и снижение вероятности ошибок при контроле.

В связи с поставленной целью в работе должны быть решены следующие **задачи**:

1. анализ технологии проверки функционирования и контроля метрологических характеристик счетчиков электроэнергии на производственных предприятиях;
2. анализ методов повышения точности измерительных трансформаторов тока и их защиты от воздействия внешнего постоянного магнитного поля в составе счетчика электроэнергии;
3. разработка конструктивно простого активного трансформатора тока, имеющего в номинальном режиме и при воздействии внешнего постоянного магнитного поля существенно меньшие погрешности, чем стандартный трансформатор аналогичных габаритов;
4. разработка методов косвенного оценивания максимальных токовой и угловой погрешностей трансформаторов тока, позволяющих без использования эталонного трансформатора тока и прибора сравнения определять погрешности стандартных трансформаторов тока;
5. разработка методов автоматизированного проведения проверки функционирования и контроля метрологических характеристик счетчиков электроэнергии при их серийном производстве, а также разработка аппаратного и программного обеспечения для их реализации (автоматизированные испытательные стенды и вспомогательные технологические устройства, такие как модуль дискретного ввода-вывода, технологический USB-концентратор с защитой от импульсных помех);
6. разработка метода испытания счетчиков электроэнергии на влияние постоянной составляющей и четных гармоник, обеспечивающего большую достоверность результатов испытаний, чем метод, рекомендованный в ГОСТ Р 52322–2005.

Методы исследования. В теоретической части работы использовались методы теорий магнитного поля, погрешностей, измерения переменного электрического тока и электрической мощности. Экспериментальные исследования проводились с использованием прецизионного калибратора фиктивной мощности, внесенного в государственный реестр средств измерений. При расчетах и моделировании разрабатываемых схем использовались программные пакеты NI Multisim и NI LabVIEW.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается совпадением с достаточной на практике точностью экспериментальных данных и результатов моделирования, полученных при апробации разработанных методов, с результатами, полученными стандартными общепринятыми методами с применением эталонных средств измерения. Разработанные методы автоматизированного технологического контроля и их практические реализации оказались более эффективными, чем неавтоматизированные, что подтверждается прямыми оценками временных затрат при их эксплуатации.

Научная новизна

1. Разработана схема активного трансформатора тока с дополнительной обмоткой и усилителем в обратной связи, позволяющая достигать погрешностей в номинальном режиме и в режиме подмагничивания внешним постоянным магнитным полем на 1-2 порядка меньше, по сравнению со стандартным трансформатором тока аналогичных габаритов. Разработана математическая модель, на основе которой получено выражение для основной составляющей его погрешностей, вызванной током намагничивания.
2. Предложены методы косвенного оценивания максимальной токовой и угловой погрешностей трансформатора тока, основанные на измерении тока намагничивания, для использования которых не требуется применение эталонного трансформатора тока и прибора сравнения.
3. Разработана и экспериментально проверена комплексная система решений для автоматизированного технологического контроля метрологических характеристик и проверки функционирования счетчиков электроэнергии при серийном производстве. Они позволяют минимизировать влияние субъективного человеческого фактора на результаты контроля, повысить устойчивость работы технологического оборудования, повысить производительность соответствующих этапов производства на 50-80 %.
4. Предложен метод испытания счетчиков на влияние постоянной составляющей и четных гармоник, нечувствительный к неидентичности параметров токозадающих диодов в испытательной схеме, при использовании которого дополнительная инструментальная погрешность, добавляемая к полученной в результате испытания погрешности счетчика, составляет менее 0,1 % для счетчиков класса точности 1.

Практическая ценность работы. Разработанная модель активного трансформатора тока может быть использована для изготовления образцового трансформатора тока класса точности 0,01 и выше, а также трансформатора тока или счетчика электроэнергии, способного сохранять свои метрологические

характеристики в условиях сильного внешнего постоянного магнитного поля. Разработанные методы косвенного оценивания максимальных токовой и угловой погрешностей трансформаторов тока могут быть использованы для исследования трансформаторов тока различного класса точности, с применением только стандартного лабораторного измерительного оборудования. Разработанные автоматизированные стенды проверки функционирования и контроля метрологических характеристик счетчиков электроэнергии и программное обеспечение для них позволяют повысить производительность соответствующих этапов производственного процесса на предприятии, снизить риск ошибок контроля, повысить надежность технологического оборудования. Предложенный метод испытания счетчиков электроэнергии на влияние постоянной составляющей и четных гармоник может использоваться для получения достоверных результатов при проведении данного испытания.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследований использованы для проектирования и реализации технологических модулей (модуль дискретного ввода-вывода, USB-концентратор с защитой), необходимых для автоматизации процесса производства счетчиков электроэнергии. На предприятии АО «Радио и Микроэлектроника» введены в эксплуатацию технологические стенды, в разработке которых автор принимал непосредственное участие (акт о внедрении приложен к диссертационной работе):

- Стенды автоматизированного контроля функционирования однофазных и трехфазных счетчиков электроэнергии;
- Стенды автоматизированного контроля метрологических характеристик однофазных и трехфазных счетчиков электроэнергии;

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенная схема активного трансформатора тока является конструктивно простой и позволяет достигать погрешностей в номинальном режиме и в режиме подмагничивания внешним постоянным магнитным полем на 1-2 порядка меньше, по сравнению со стандартным трансформатором тока аналогичных габаритов.
2. Разработанные методы косвенного оценивания максимальных погрешностей трансформаторов тока позволяют получать достоверные оценки максимальной токовой и угловой погрешностей трансформаторов тока без использования эталонного трансформатора тока и прибора сравнения.
3. Разработанная комплексная система решений для технологического контроля производства счетчиков электроэнергии, включающая технологические модули, автоматизированные технологические стенды и соответствующее программное обеспечение, позволяет проводить контроль функционирования счетчиков электроэнергии при серийном производстве с производительностью до 50 % больше, а контроль метрологических характеристик – до 80 % больше, чем на неавтоматизированных стендах, практически без участия оператора и при минимизации ошибок контроля.
4. Разработанный метод испытания счетчиков электроэнергии на влияние постоянной составляющей и четных гармоник позволяет определять дополни-

тельную погрешность счетчиков с дополнительной инструментальной погрешностью результата, добавляемой к полученной в результате испытания оценке погрешности счетчика, менее 0,1 % для счетчиков класса точности 1.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности:

1. п.1. Создание новых научных, технических и нормативно-технических решений, обеспечивающих повышение качества продукции, связанных с измерениями групп 1-5 (измерение электрических и магнитных величин).
2. п.3. Совершенствование научно-технических, технико-экономических, оперативных (временных) показателей метрологического обеспечения соответствующих систем и производств.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных, всероссийских и региональных конференциях: Международная научно-практическая конференция «Измерения в современном мире-2013», г. Санкт-Петербург, 2013 г.; конкурс грантов НГТУ-2013, г. Новосибирск, 2013 г.; Всероссийская научная конференция «Наука. Технологии. Инновации (НТИ-2014)». Секция «Измерительная техника», г. Новосибирск, 2014 г.; Областной конкурс «Научный потенциал студентов и аспирантов НГТУ», г. Новосибирск, 2014 г.; Областной конкурс «Научный потенциал студентов и молодых ученых Новосибирской области», г. Новосибирск, 2014 г.; Конкурс грантов НГТУ-2014, г. Новосибирск, 2014 г.; Городская научная конференция магистрантов и аспирантов НГТУ «Progress thorough innovation», г. Новосибирск, 2015 г.; Международная научно-техническая конференция "Измерение, контроль, информатизация (ИКИ-2015)», г. Барнаул, 2015 г.; Всероссийская научная конференция «Наука. Технологии. Инновации (НТИ-2015)». Секция «Измерительная техника», г. Новосибирск, 2015г.; Международная научно-техническая конференция «Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения (АППР-2016)», г. Севастополь, 2016 г.; Всероссийская научная конференция «Наука. Технологии. Инновации (НТИ-2017)». Секция «Автоматика, измерения и информационная безопасность», г. Новосибирск, 2017 г.

По результатам работы автор стал призёром в следующих конкурсах: Конкурс грантов НГТУ – 2013 (присужден грант № 025 – НСГ-13 Новосибирского Государственного Технического Университета); Конкурс грантов НГТУ – 2014 (присужден грант № 001 – НСГ-14 Новосибирского Государственного Технического Университета); Городская научная конференция магистрантов и аспирантов НГТУ «Progress thorough innovation» – 2015, лучший доклад на секции «Power engineering».

Публикации. Основные результаты исследований отражены в 15 публикациях: 5 статей в научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК, в том числе 1 проиндексирована в базе данных Scopus; 9 статей в рецензируемых научных журналах и сборниках трудов международных и российских конфе-

ренций; 1 патент на полезную модель. Личный вклад автора в указанных работах не менее 70 %.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы из 74 наименований и 8 приложений. Работа содержит 153 страницы основного текста, включая 52 рисунка и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследований, определены решаемые задачи, указаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первом разделе «Датчики тока в счетчиках электроэнергии и технологический контроль при производстве счетчиков» приведен обзор датчиков тока, применяемые в счетчиках электроэнергии, в частности, трансформаторов тока, источников погрешностей и методов их уменьшения, а так же обзор основных видов контроля при производстве счетчиков электроэнергии и используемого технологического оборудования.

В счетчиках электроэнергии наибольший вклад в погрешность вносит датчик тока, который работает в широком динамическом диапазоне (до 400 и более). В качестве датчиков тока применяют шунты, трансформаторы тока (ТТ) и катушки Роговского. Для счетчиков класса точности 1 и выше чаще всего применяют измерительные трансформаторы тока, которые обладают следующими преимуществами: гальваническая развязка от цепи измеряемого тока, широкий динамический диапазон, высокая чувствительность и линейность, стабильность параметров. Недостатками являются возможность измерения только переменного тока, ухудшение характеристик при насыщении, например, при воздействии постоянного тока или магнитного поля.

Уравнение ТТ имеет вид:

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_2 w_2 + \dot{I}_0 w_1 \quad (1)$$

Здесь $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$ – комплексные амплитуды первичного и вторичного токов, w_1 , w_2 – число витков первичной и вторичной обмоток, $\dot{I}_0$ – ток намагничивания (ток холостого хода). Ток намагничивания определяется остаточным магнитным потоком в магнитопроводе, благодаря которому осуществляется передача энергии от первичной обмотки к вторичной. Этот ток зависит от параметров ТТ и вносит основной вклад в его погрешность.

Для уменьшения погрешностей трансформатора применяют материалы магнитопровода с более высокой магнитной проницаемостью, большего сечения. Существуют и более сложные пассивные методы уменьшения погрешности ТТ, такие как витковая коррекция, спрямление кривой намагничивания, создание нулевого потока. Эти методы имеют значительные ограничения, не дают существенного уменьшения погрешностей. Существуют также различные активные схемы уменьшения остаточного магнитного потока в магнитопроводе, в которых используются усилители тока и напряжения. В активных ТТ используются дополнительные обмотки и сердечники, через которые организуется об-

ратная связь, за счет которой остаточный магнитный поток и, соответственно, ток намагничивания уменьшаются. Вследствие этого снижется погрешность: для активных ТТ токовая погрешность может достигать сотых и тысячных долей процента, угловая – единиц микроградусов, что обычно не достижимо для пассивных схем. Чаще всего активные схемы требуют значительного усложнения конструкции и увеличения габаритов ТТ (за счет использования дополнительных сердечников, обмоток, усилителей), поэтому они обычно не используются в серийных приборах и служат лабораторными эталонами.

Существующие эталонные ТТ бывают как пассивными, так и с использованием различных активных схем. Некоторые пассивные трансформаторы имеют класс точности порядка 0,01 (например, ИТТ-3000.5, ТТИ-100), в то время как, например, активный эталонный ТТ Tettex 4764 имеет класс точности 0,001.

ТТ чувствительны к воздействию внешнего магнитного поля, поэтому одним из способов кражи электроэнергии является использование постоянных магнитов вблизи измерительных ТТ, используемых в счетчиках электроэнергии. В этом случае магнитопровод насыщается и теряет чувствительность. Для защиты от такого вида кражи в некоторых случаях в счетчики вносят конструктивные особенности, обеспечивающие удаление ТТ от края корпуса, а также магнитное экранирование. Такой метод не защищает от воздействия от магнитов с большой индукцией. Другим способом защиты является применение датчиков тока иного типа (катушка Роговского, шунт): они не подвержены влиянию внешнего магнитного поля, но имеют ряд существенных недостатков, таких как меньшая чувствительность, а для шунта также самонагрев, отсутствие гальванической изоляции. Иногда применяют датчик магнитного поля, который позволяет быстро отключить потребителя с помощью реле и предотвратить кражу электроэнергии, но этот метод требует схемы коммутации нагрузки. Некоторые активные схемы, дополняющие ТТ, позволяют ему функционировать с незначительной погрешностью даже в условиях внешнего постоянного магнитного поля, о чем будет подробнее написано во втором разделе.

Серийное производство современных счетчиков электроэнергии состоит из нескольких этапов, на каждом из которых необходимо выполнять промежуточный контроль. Виды контроля можно условно разделить на две категории – контроль функционирования (работы функциональных блоков) и метрологических характеристик (погрешностей) счетчиков. На существующих технологических стендах проверки функционирования счетчиков все операции (контроль напряжения внутреннего источника питания, проверка реле для коммутации нагрузки, интерфейсов передачи данных, датчиков и др.) выполняются оператором. Они требуют механических переключений режимов (токов, напряжений) с помощью тумблеров и кнопок; запуска отдельных программ для проверки функциональных блоков; измерений параметров цепей отдельными измерительными приборами. При этом оператор самостоятельно выполняет последовательность проверок и анализирует их результаты, принимает решение о годности прибора. В связи с этим производительность таких стендов не высокая, существует риск ошибок первого и второго рода, связанный с человеческим фактором. Такие стенды требуют регулярной замены механических переключа-

телей, которые выходят из строя. В существующих стендах для контроля метрологических характеристик используется метод сличения с эталонным счетчиком. Они автоматизированы частично: оператору необходимо вручную с помощью рукояток выставлять режим контроля (напряжение, ток, сдвиг фазы), после чего в программе сравниваются показания эталонного и проверяемых счетчиков и вычисляются погрешности. Как и для стендов проверки функционирования, выбор конкретных проверок и их параметров задает оператор стенда, поэтому существует риск не полного или ошибочного контроля.

Во втором разделе «Разработка активного трансформатора тока и методов косвенного оценивания погрешностей трансформаторов тока» рассмотрены характеристики трансформаторов тока, источники их погрешностей, а также конструкция, принцип действия и характеристики разработанного активного трансформатора тока (АТТ). Исследовано влияние внешнего постоянного магнитного поля на стандартный и активный ТТ. Представлены разработанные методы косвенного оценивания максимальных погрешностей трансформаторов тока, основанные на измерении тока намагничивания.

В магнитопроводе трансформатора тока присутствует остаточный магнитный поток, с которым связан ток намагничивания $\dot{I}_0$: он является частью первичного тока и осуществляет передачу энергии от первичной обмотки к вторичной. В то же время этот ток является основным источником погрешностей трансформатора тока: токовой и угловой. Уравнение трансформатора тока описывает формула (1). Из нее видно, что чем меньше ток намагничивания $\dot{I}_0$, тем ближе значения $\dot{I}_1 w_1$ и $\dot{I}_2 w_2$ и, соответственно, меньше погрешности трансформатора. Эквивалентная схема замещения ТТ показана на рисунке 1.

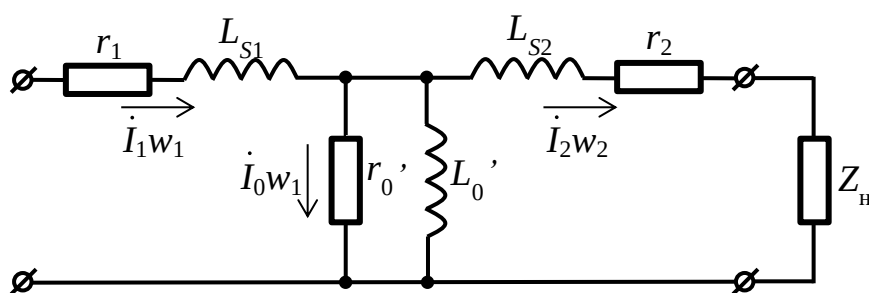


Рисунок 1 – Схема замещения ТТ в номинальном режиме.

Здесь r_0' , L_0' – эквивалентные активное сопротивление и индуктивность ветви намагничивания, приведенные к первичной обмотке; r_1 , r_2 – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток, соответственно; L_{S1} , L_{S2} – индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток, соответственно.

При большом значении магнитного потока в магнитопроводе (и, соответственно, тока $\dot{I}_0$), связанного с большим первичным током или, например, с подмагничиванием, вызванным постоянным током или внешним магнитным полем, магнитопровод может насыщаться, а его магнитная проницаемость резко уменьшаться. При этом ток намагничивания перестает быть синусоидаль-

ным и значительно увеличивается его среднеквадратическое значение, что приводит к увеличению погрешностей ТТ. Например, при поднесении к трансформатору тока постоянного магнита с магнитной индукцией более 0,1 Тл токовая погрешность трансформатора тока может достигать $-90 \dots 95 \%$, а угловая 90° .

Для уменьшения погрешностей трансформатора тока необходимо уменьшать ток намагничивания. Это можно сделать с помощью активной схемы с усилителем (рисунок 2).

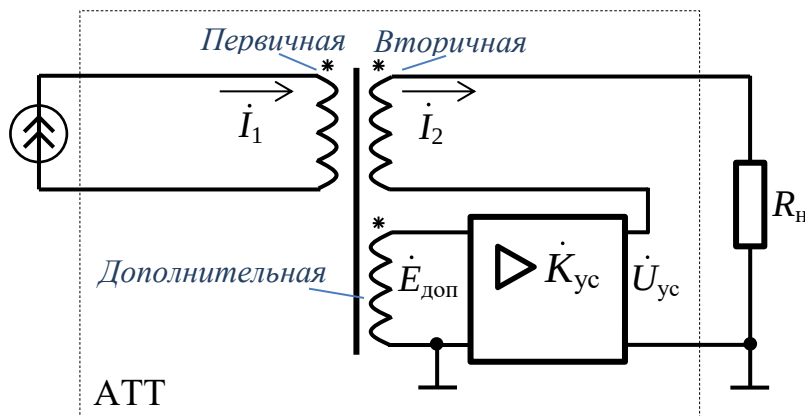


Рисунок 2 – Функциональная схема активного трансформатора тока.

Данная схема является конструктивно простой, для ее реализации используется стандартный двухобмоточный ТТ, который дополняется индикаторной (дополнительной) обмоткой и усилителем. Благодаря этому образуется обратная связь, поддерживающая вторичный ток максимально близким к первичному, деленному на коэффициент трансформации. Математическая модель АТТ представляет собой уравнение зависимости вторичного тока от первичного:

$$\dot{I}_2 = -\dot{I}_1 \frac{N_1}{N_2} \left[\frac{1}{1 + \frac{2\pi r Z_2 e^{j(\varphi_2 - \varphi_{yc} + \pi/2)}}{N_2 \omega \mu_0 S N_{доп} |K_{yc}|}} \right] \quad (2)$$

Здесь $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$ – комплексные амплитуды первичного и вторичного токов, соответственно; N_1 , N_2 , $N_{доп}$ – число витков первичной, вторичной и дополнительной (индикаторной) обмоток, соответственно; r – средний радиус магнитопровода (тора), S – площадь поперечного сечения магнитопровода; ω – угловая частота тока; Z_2 – импеданс вторичной цепи (включая и нагрузку и вторичную обмотку); φ_2 , φ_{yc} – фазовый сдвиг, вносимый вторичной цепью и усилителем, соответственно, на частоте ω ; $|K_{yc}|$ – модуль коэффициента усиления усилителя; μ – средняя магнитная проницаемость магнитопровода.

В данной упрощенной модели полагается, что ЭДС вторичной обмотки равна нулю: на самом деле она не нулевая, но во много раз меньше напряжения на выходе усилителя, поэтому ей можно пренебречь. Также в модели не учитывается нелинейное изменение магнитной проницаемости магнитопровода в зависимости от магнитной индукции поля внутри сердечника и гистерезис. Однако,

эти явления не оказывают существенного влияния на работу АТТ: за счет обратной связи магнитный поток внутри сердечника имеют существенно меньшую величину, чем у обычного трансформатора тока при тех же условиях, поэтому изменение магнитной проницаемости сравнительно небольшое.

Выражения для токовой γ_I и угловой δ_φ погрешностей АТТ, полученные из математической модели, имеют вид:

$$\gamma_I = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{2\pi r Z_2 \sin(\varphi_{yc} - \varphi_2)}{N_2 \omega \mu \mu_0 S N_{доп} |K_{yc}|}\right)^2 + \left(\frac{2\pi r Z_2 \cos(\varphi_{yc} - \varphi_2)}{N_2 \omega \mu \mu_0 S N_{доп} |K_{yc}|}\right)^2}} - 1 \quad (3)$$

$$\delta_\varphi = \arctg \left(\frac{2\pi r R_2 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{yc}\right)}{N_2 \omega \mu \mu_0 S N_{доп} K_{yc} + 2\pi r R_2 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{yc}\right)} \right) \quad (4)$$

Регулируя параметры усилителя можно корректировать погрешности АТТ. При этом, даже при наличии сильного внешнего магнитного поля, когда магнитная проницаемость μ значительно уменьшается, за счет усилителя и обратной связи погрешности оказываются существенно меньше погрешностей стандартного трансформатора при тех же условиях. В экспериментах при поднесении вплотную к АТТ неодимового магнита с силой сцепления 100 кг (магнитная индукция вблизи поверхности магнита около 0,2 Тл) погрешность составила от -50 до 50 % для АТТ и -90...-100 % для стандартного ТТ. При этом токовая погрешность АТТ может быть практически равной нулю – в зависимости от частотной характеристики усилителя. В лучшем случае в экспериментах для используемого усилителя токовая погрешность составила около 1 %, а угловая 6 °. Используя данное свойство АТТ можно построить счетчик электрической энергии с защитой от воровства с помощью постоянных магнитов.

При нормальных условиях погрешность активного трансформатора тока мала и ее сложно измерить напрямую, поэтому производилась ее косвенная оценка. Как было отмечено выше, главным источником погрешностей трансформатора тока является ток намагничивания $\dot{I}_0$. Если намотать на ТТ дополнительную обмотку, то этот ток наводит на ней пропорциональную этому току ЭДС. Разомкнутая обмотка не влияет на работу стандартного трансформатора и используется для организации обратной связи в активном. В АТТ ЭДС дополнительной обмотки в проводимых экспериментах оказалась примерно в 20 раз меньше, чем в используемом стандартном трансформаторе (класса точности 0,1), следовательно, во столько же раз меньше его погрешности. Таким образом, класс точности активного трансформатора тока составил 0,005.

Для калибровки и поверки трансформаторов тока применяют дифференциально-нулевой метод определения погрешностей, который требует использования эталонов – образцового трансформатора тока и компаратора тока. Такое измерительное оборудование дорогое и имеет ограничения по классу точности калибруемых трансформаторов. В связи с этим, разработаны методы косвенно-

го оценивания максимальных токовой и угловой погрешностей стандартных трансформаторов тока (не имеющих схем компенсации и активных схем), позволяющие оценивать максимальные значения погрешностей трансформаторов тока различного класса точности. Поскольку основным источником погрешностей трансформатора тока является ток намагничивания, то, измерив его, можно оценить погрешности ТТ. Для этого измеряется его среднеквадратическое значение для определенного первичного тока. Тогда максимальные (предельные) значения погрешностей при этих токах определяются по формулам:

$$\gamma_{I, \max} = \frac{I_0}{I_1} \cdot 100, \% \quad (5)$$

$$\varphi_{\max} = \frac{I_0}{I_1} \cdot \left(\frac{180}{\pi} \right) \cdot 60, ' \quad (6)$$

Исследовались два способа измерения тока намагничивания: методом холостого хода и методом подачи напряжения во вторичную обмотку.

В методе холостого хода вторичная обмотка разомкнута, а в первичную обмотку подается ток $I_{1,0}$, имитирующий ток намагничивания, который протекает в ТТ в номинальном режиме. Измеряется напряжение на разомкнутой вторичной обмотке U_2 . Полагается, что в номинальном режиме при такой же ЭДС вторичной обмотки $\varepsilon_2 = U_2$ в трансформаторе будет протекать ток намагничивания, равный $I_{1,0}$. Таким образом, получается экспериментальная зависимость ЭДС вторичной обмотки от тока намагничивания $\varepsilon_2(I_{1,0})$. В номинальном режиме ЭДС вторичной обмотки можно вычислить для любого первичного тока как

$$\varepsilon_2 = \frac{I_1}{n} (R_2 + r_{2 \text{ обм}}) \quad (7)$$

Здесь n – коэффициент трансформации, R_2 – номинальное сопротивление нагрузки вторичной обмотки, $r_{2 \text{ обм}}$ – активное сопротивление вторичной обмотки. Приняв, что эта ЭДС равна напряжению на вторичной обмотке в опыте холостого хода $\varepsilon_2 = U_2$, по полученным экспериментальным данным можно определить какой ток намагничивания присутствует в ТТ при такой ЭДС (и соответствующем первичном токе) и вычислить максимальные погрешности ТТ по формулам 5-6.

В методе подачи напряжения во вторичную обмотку первичная обмотка разомкнута. Во вторичную обмотку подается синусоидальное напряжение U_2 , которое имитирует ее ЭДС в номинальном режиме. При этом измеряется ток во вторичной обмотке $I_{2,0}$, который соответствует току намагничивания номинального режима. Полагается, что подаваемому в эксперименте напряжению в номинальном режиме соответствует ЭДС $\varepsilon_2 = U_2$ при определенном первичном токе. Этот ток определяется как

$$I_1 = \frac{\varepsilon_2}{R_2 + r_{2 \text{ обм}}} n \quad (8)$$

Таким образом, данный метод также позволяет установить однозначную связь между током намагничивания и соответствующим первичным током, из

которой можно вычислить максимальные оценки токовой и угловой погрешностей по формулам 5-6.

Сравнение результатов оценивания погрешностей трансформатора тока ТШП 0,66 500/5 УЗ с использованием косвенных методов с результатами поверки в Новосибирском государственном центре стандартизации, метрологии и испытаний в Новосибирской области (Новосибирском ЦСМ) показало, что максимальные оценки погрешностей для всех методов практически совпали (рисунки 3-4). Свидетельство о поверке №372285 и протокол прилагаются.

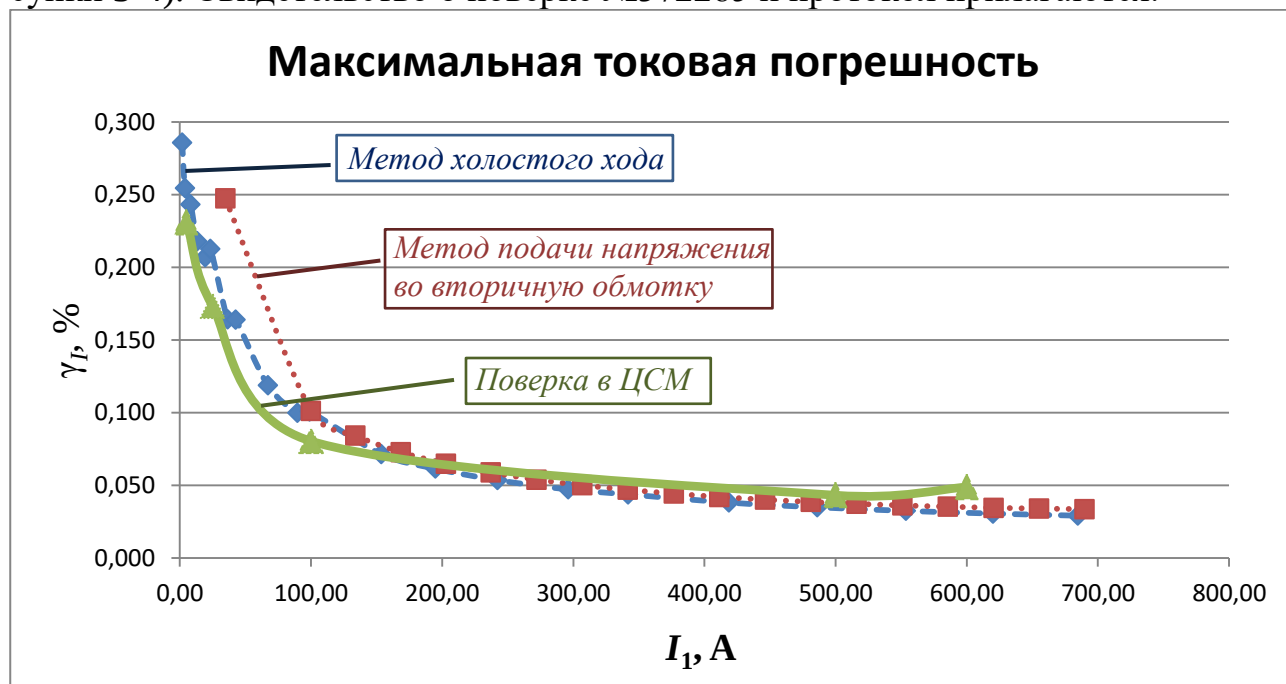


Рисунок 3 – Зависимости максимальной токовой погрешности от первичного тока, определенной косвенными методами и при поверке в ЦСМ.

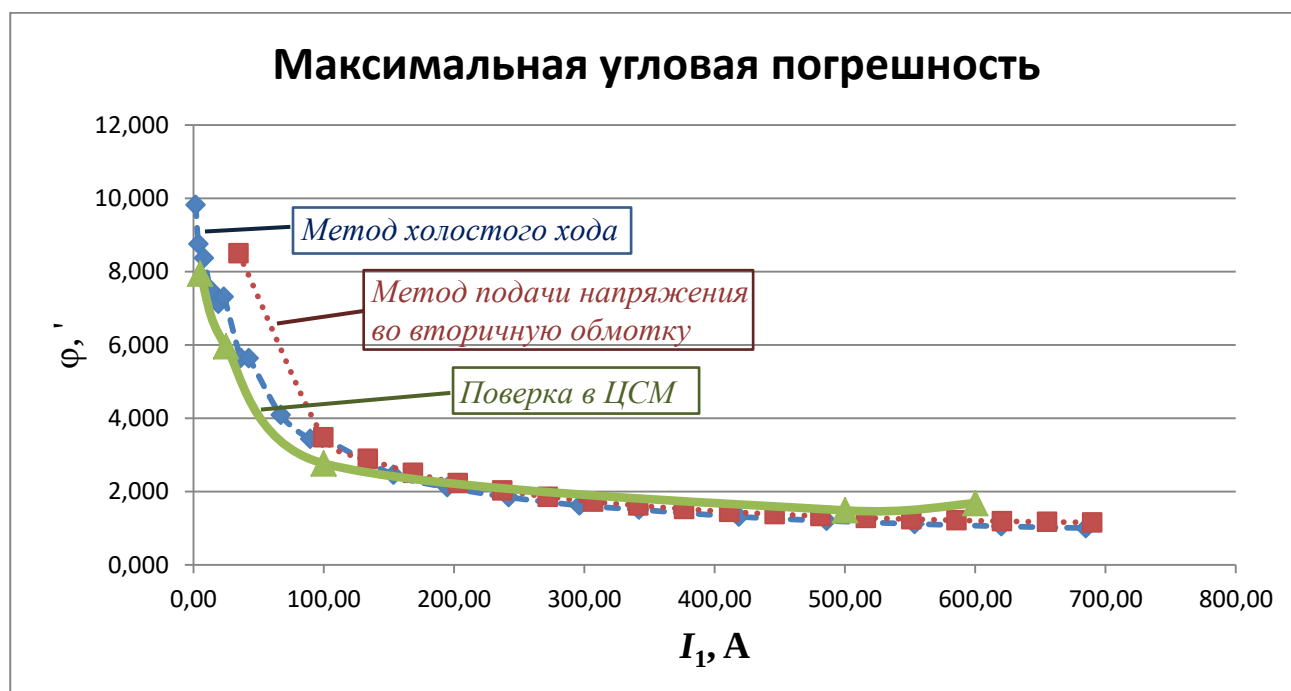


Рисунок 4 – Зависимости максимальной угловой погрешности от первичного тока, определенной косвенными методами и при поверке в ЦСМ.

В третьем разделе «Автоматизированный технологический контроль при серийном производстве счетчиков электроэнергии» представлен комплекс решений для автоматизации технологического контроля счетчиков электроэнергии при их производстве. К ним относятся разработанные специализированные технологические модули, автоматизированные технологические стенды и программное обеспечение. Приведено сравнение разработанных и существующих технологических стендов: их конструкции, характеристик, производительности.

Одной из задач для обеспечения автоматизированного контроля счетчиков является замена ручных механических переключателей на программно управляемые ключи. Для этого разработан модуль дискретного ввода-вывода, управляемый с компьютера. Собственная разработка такого модуля вместо использования покупного аналога обусловлена главным образом необходимостью адаптирования его под специфические задачи технологического контроля, что связано с модификацией его прошивки. Кроме этого, характеристики внутренних ключей модуля подходят именно для коммутации типовых цепей, необходимых для контроля счетчиков. Выходы используются для управления оптронами, силовыми ключами, реле. Входы – для определения состояния линий. Разработанная прошивка для контроллера модуля может быть адаптирована для специальных функций, не предусмотренных базовой прошивкой.

В технологических стендах используется множество модулей, подключаемых к компьютеру по USB (конверторы интерфейсов, различные измерительные и управляющие модули). Из-за импульсных помех, возникающих на производственном участке вследствие коммутации различных цепей, USB-устройства часто зависают и для продолжения работы требуют перезагрузки. Для решения этой проблемы был разработан USB-концентратор с защитой линий питания и данных шины USB от импульсных помех с помощью диодного супрессора USBLC6-4 и RC-фильтров, а также имеющего гальваническую развязку от компьютера. Как показала практика, зависаний USB-устройств при подключении их через данный концентратор не наблюдается, в то время как при использовании обычного покупного USB-концентратора на стенде контроля функционирования счетчиков наблюдалось по несколько (до 10 и более) зависаний USB-модулей в течение рабочей смены.

Описанные технологические модули применяются в составе разработанных технологических стендов контроля функционирования счетчиков. Модуль дискретного ввода-вывода обеспечивает коммутации цепей в стенде посредством внешних полупроводниковых ключей, которые в отличие от механических переключателей долговечны и не требуют периодической замены. Для коммутации сетевого напряжения используются оптосимисторы, которые выполняют включение и отключение в момент перехода входного сигнала через ноль, благодаря чему исключается возникновение искры и повышается устойчивость работы всего стенда. Разработанный USB-концентратор обеспечивает стабильную работу всех подключенных устройств (конверторы интерфейсов, управляющий и измерительный модули). На данном стенде выполняются измерения параметров внутренних цепей счетчика, его настройка, проверка интерфейсов передачи

данных, дополнительных функций. Алгоритм всех этих проверок и управление устройствами стенда обеспечивает программа, написанная в среде LabVIEW. В ней заложен алгоритм проведения проверок для определенного типа счетчиков. Параллельно выполняемым тестам программа обеспечивает сохранение результатов проверок в базу данных, обслуживание пользовательского интерфейса с журналированием процесса проверки. Большая часть проверок осуществляется полностью автоматически, а в некоторых требуется участие оператора (например, нажать кнопки или микропереключатели на счетчике). При выполнении некоторых проверок возможно оперативное устранение неисправности (например, выправление загнутого светодиода): в этом случае при отрицательном результате проверки в программе оператору предлагается повторить только данную проверку без повторного запуска всего набора операций, за счет этого производительность работы стенда повышается. Таким образом, стенды автоматизированы и требуют от оператора установить проверяемый счетчик на контактирующее устройство, запустить программу, в некоторых случаях выполнить определенные воздействия на счетчик. По сравнению с аналогичными ручными неавтоматизированными стендами производительность разработанных стендов контроля функционирования выше примерно на 50 % (4-4,5 минуты на один контроллер по сравнению с 5-7 минутами на ручном стенде); оценка времени проверки производилась на 10 партиях по 10 счетчиков. Исключен риск ошибки из-за человеческого фактора, повышена надежность стендов за счет замены механических переключателей на полупроводниковые ключи и защиты USB устройств от импульсных помех.

Для автоматизированного контроля метрологических характеристик счетчиков разработаны стенды и программное обеспечение в среде LabVIEW. Контроль проводится по методу задаваемой стабилизированной мощности, которую обеспечивает калибратор фиктивной мощности КФМ-06. Класс точности разных модификаций калибраторов составляет 0,1 или 0,05, что является достаточным для калибровки счетчиков класса точности 1, 0,5 и 0,5S. Разработанная программа обеспечивает последовательное определение погрешностей счетчика в разных режимах, при этом список тестов задается технологом через конфигурактор. При необходимости технолог может добавлять, удалять тесты или изменять их параметры. Погрешность счетчиков рассчитывается в программе по измерениям периода сигналов на испытательных выходах счетчиков, выполняется их сравнение с установленными нормами (также задаваемых в конфигуракторе). На стендах с ручным управлением оператору необходимо вручную переключать токи, напряжения и регулировать сдвиг фаз, что существенно дольше, чем программная установка режима на генераторе КФМ. Разработанные автоматизированные стенды, более производительны по сравнению с ручными неавтоматизированными стендами: среднее время проверки одного счетчика примерно на 80 % меньше, чем на ручных стендах; оценка времени работы стенда производилась аналогично стенду контроля функционирования. В процессе выполнения контроля от оператора требуется установить счетчик на контактирующее устройство и запустить программу, после чего вплоть до окончания

проверки никаких действий от него не требуется. За счет этого имеется возможность работать одновременно на нескольких стендах.

В программном обеспечении для всех разработанных стендов предусмотрен контроль функционирования всех входящих в его состав устройств. При сбое любого из них в программе выдается диагностическое сообщение с указанием типа устройства. Это позволяет оперативно найти и устранить неисправность.

В четвертом разделе «Разработка метода испытания счетчиков электроэнергии на влияние постоянной составляющей и четных гармоник» проанализирована схема испытания счетчиков электроэнергии на влияние постоянной составляющей и четных гармоник, рекомендованная в ГОСТ Р 52322–2005. Предложен метод испытаний счетчиков, имеющий большую достоверность результатов.

При производстве счетчики электроэнергии проходят испытания в разных условиях, отличающихся от нормальных. Все они описаны в ГОСТ Р 52322–2005. Одним из них является испытание на влияние постоянной составляющей и четных гармоник, в котором определяется дополнительная погрешность счетчика в условиях наличия постоянной составляющей и четных гармоник в цепи тока. Исследование схемы проведения испытания, рекомендованной в ГОСТ (рисунок 5) показало, что неидентичность параметров диодов D_1 , D_2 , задающих токи в схеме, может привести к погрешности результата измерения дополнительной погрешности счетчика, вносимой испытательной схемой, соизмеримой с погрешностью самого счетчика.

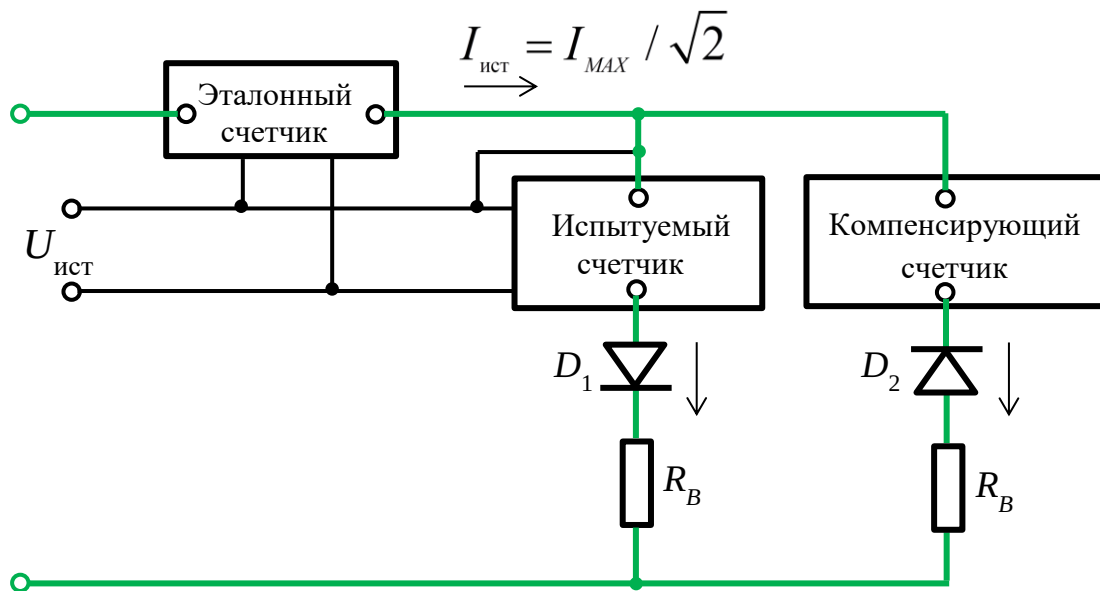


Рисунок 5 – схема испытания счетчиков электроэнергии на влияние постоянной составляющей и четных гармоник, рекомендуемая в ГОСТ Р 52322–2005.

Для определения возможной несимметрии токовых цепей испытательной схемы исследовались диоды SF18, КД213А, а также диоды Шоттки 30СРQ150. Для них такие параметры как сопротивление базы и обратный ток насыщения аналогичных диодов из одной партии могут отличаться на 30-35 % (цифры оказались близкими для всех исследуемых типов диодов). Разброс параметров

двух диодов, используемых в испытательной схеме, влияет на результаты испытания. Это влияние зависит от напряжения источника в цепи тока, поскольку при этом разным оказывается сопротивление токозадающего резистора R_B . Чем меньше напряжение, тем меньше сопротивление токозадающего резистора для получения требуемого тока, и тем больше сказывается разброс параметров диодов на токи в ветвях схемы. Показано, что этот уровень напряжения должен составлять 10-12 В для уменьшения до уровня 0,5-0,6 % дополнительной инструментальной погрешности, вносимой несимметрией токов в ветвях испытательной схемы. Однако при этом мощность, потребляемая токовой цепью ИС, может достигать 700-800 Вт. При напряжении 2В мощность в цепи становится менее 200 Вт, но и погрешность, вносимая испытательной схемой, может достигать 4 % и более, что больше погрешности счетчика.

Для устранения данного недостатка был разработан метод проведения испытаний, в котором используется модифицированная испытательная схема.

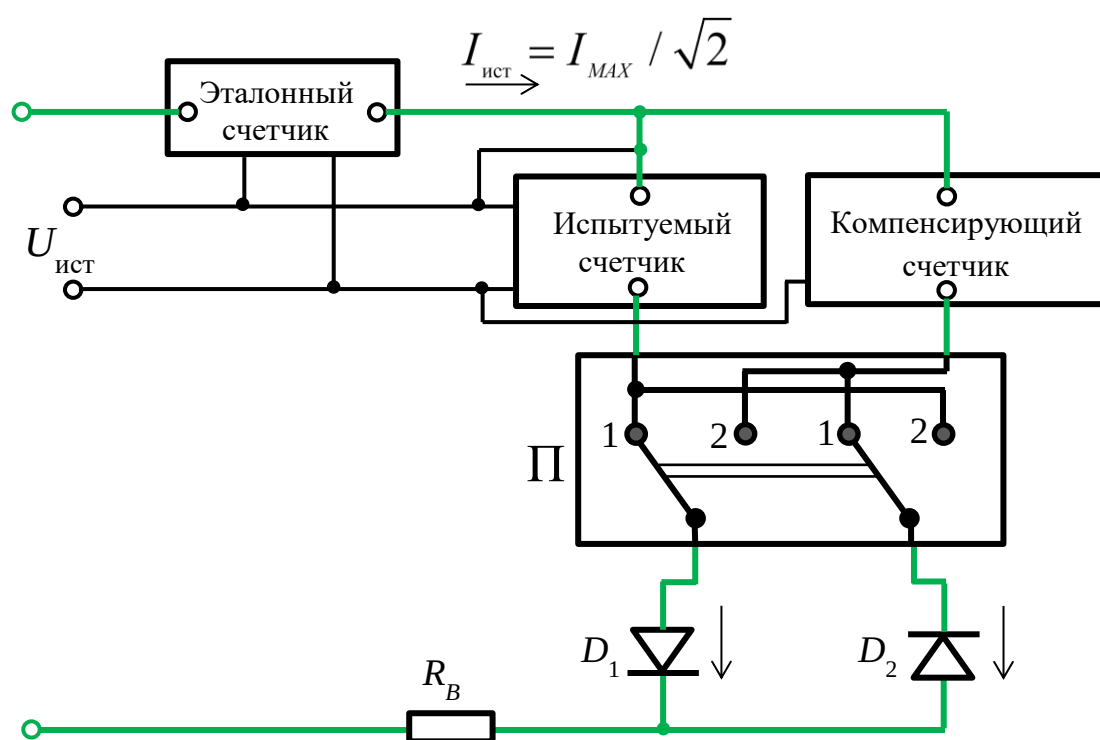


Рисунок 6 – схема испытания счетчиков электроэнергии на влияние постоянной составляющей и четных гармоник для разработанного метода.

В схеме, показанной на рисунке 5, погрешность счетчика определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{\Delta}{N_0 / 2} = \frac{N_0 / 2 - N_1}{N_0 / 2} \quad (9)$$

Здесь N_0 – показания эталонного счетчика, N_1 – показания испытуемого счетчика, которые отличаются от $N_0 / 2$ как за счет погрешности счетчика, так и за счет несимметрии токов в цепях ($I_1 \neq I_2 \neq I_0 / 2$). Поэтому погрешность, вычисленная по (9), может отличаться от реальной погрешности счетчика.

Для разработанного метода и модифицированной схемы (рисунок 6) погрешность счетчика определяется по формуле:

$$\gamma_1 = \frac{2\Delta_1}{\frac{N_0}{2} + \frac{N'_0}{2}} = \frac{2(N_1 + N'_1)}{N_0 + N'_0} - 1 \quad (10)$$

Здесь N_0 , N_1 – показания эталонного и испытуемого счетчиков, соответственно, при одном положении переключателя П, N'_0 , N'_1 – при втором положении переключателя П. При этом $N_0 = N'_0$ а N_1 и N'_1 отличаются от $N_0 / 2$ на одну и ту же величину, но с разным знаком, за счет чего их сумма не зависит от неидентичности диодов и γ определяется только собственной погрешностью счетчика.

Моделирование схемы в симуляторе Multisim подтвердило, что при использовании данной схемы неидентичность параметров используемых в ее составе диодов практически не вносит дополнительной инструментальной погрешности в результат определения собственной погрешности испытуемого счетчика электроэнергии даже при сравнительно маленьком напряжении источника (например, 2 В) и, соответственно, сопротивлении резистора R_B (рисунок 6). Для сравнения, в схеме, рекомендованной в ГОСТ (рисунок 5) эта погрешность составляет $\pm 3,3 \%$ при источнике питания с напряжением 2 В и разбросом параметров токозадающих диодов 30 %. В разработанном методе с модифицированной испытательной схемой (рисунок 6) при тех же условиях дополнительная инструментальная погрешность, вносимая испытательной схемой, составляет примерно 2 % от собственной погрешности счетчика, то есть округленно 0,1 % для счетчиков класса точности 1. Поэтому, в такой схеме возможно использование токоограничивающего резистора R_B меньшего номинала, за счет чего при том же токе в схеме будет выделяться меньшая мощность.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана схема активного трансформатора тока, представляющего собой стандартный двухобмоточный трансформатор, дополненный индикаторной обмоткой и усилителем, которые формируют обратную связь и поддерживают вторичный ток близким к первичному, деленному на коэффициент трансформации.
2. Разработана математическая модель активного трансформатора тока, позволяющая определить его токовую и угловую погрешности, в зависимости от параметров самого трансформатора и усилителя.
3. Спроектирован, изготовлен и экспериментально апробирован активный трансформатор тока, оценены его погрешности, исследована работа при воздействии постоянного магнитного поля; показано, что погрешности и в условиях воздействия магнитного поля и в номинальных условиях существенно меньше, чем для стандартного пассивного трансформатора тока (на 1-2 порядка).
4. Разработаны методы косвенного оценивания максимальных погрешностей стандартных трансформаторов тока, основанные на измерении тока намаг-

ничивания; методы позволяют производить оценивание максимальных токовой и угловой погрешностей трансформаторов тока различного класса точности без использования эталонного трансформатора тока и прибора сравнения.

5. Разработаны технологические модули, необходимые для автоматизации и повышения производительности технологического процесса серийного производства счетчиков электроэнергии: модуль дискретного ввода-вывода, управляемый программно с компьютера, USB-концентратор с защитой от импульсных помех.
6. Разработаны и внедрены в процесс серийного производства счетчиков электроэнергии на предприятии АО «Радио и Микроэлектроника» технологические стенды и программное обеспечение для контроля функционирования и метрологических характеристик счетчиков электроэнергии, повышающие производительность выполнения данных операций на 50 % и 80 %, соответственно, по сравнению с имеющимися неавтоматизированными стендами.
7. Показано, что для аналогичных полупроводниковых диодов, взятых из одной партии, разброс таких параметров как объемное сопротивление базы и обратный ток насыщения может достигать 30-35 %, что может негативно сказаться на работе схем, где важна симметрия электрических цепей, содержащих диоды.
8. Разработан метод проведения испытаний счетчиков электроэнергии на влияние постоянной составляющей и четных гармоник, при использовании которого дополнительная инструментальная погрешность, добавляемая к результату определения дополнительной погрешности счетчика и вызванная разбросом параметров установленных в разных ее ветвях токозадающих диодов, составляет менее 0,1 % для счетчиков класса точности 1.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Савиных, М.А. Образцовый счетчик электроэнергии / Ю.А. Пасынков, М.А. Савиных // Ползуновский вестник. – 2013. – №2. – С. 93-96.
2. Savinykh M.A. Investigation of an Electric Power Meter Testing Circuit for the Effect of the Constant Component and Even Harmonics / Y.A. Pasynkov, M.A. Savinykh // Measurement Techniques. – 2015. – V. 58. – I. 6. – PP. 686-691 (Scopus).
3. Савиных М.А. Технологический USB-концентратор / М.А. Савиных // Приборы. – 2016. – №8 (194). – С. 39-42.
4. Савиных М.А. Автоматизированный контроль платы преобразователя вакуумного выключателя / М.А. Савиных // Приборы. – 2017. – №6 (204). – С. 40-44.
5. Савиных М.А. Технологический контроль метрологических характеристик счетчиков электроэнергии на производстве / Ю.А. Пасынков, М.А. Савиных // Научный вестник НГТУ. – 2018. – №1(70). – С. 177-188.

Патенты

6. Заявка на полезную модель № 2017143476/28(074861). Токовая цепь счетчика электрической энергии / Ю.А. Пасынков, М.А. Савиных; патентообладатель АО «Радио и микроэлектроника». – №2017143476/28(074861); заявл. 08.12.17. – [Решение о выдаче патента от 24.04.18].

Статьи в других изданиях

7. Савиных, М.А. Образцовый датчик мощности / М.А. Савиных // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых (Новосибирск, 29 ноября – 2 декабря 2012 г.). – Новосибирск: НГТУ, 2012. – Ч. 2 – С. 31-33.
8. Савиных, М.А. Образцовый преобразователь электрической мощности в частоту / Ю.А. Пасынков, М.А. Савиных // Измерения в современном мире-2013: сборник научных трудов 4-й Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 3-5 июня 2013 г.). – Санкт-Петербург: Политехнический университет, 2013. – С. 81-82.
9. Савиных, М.А. Модернизация схемы испытания счетчиков электроэнергии на влияние постоянной составляющей и четных гармоник / М.А. Савиных // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых (Новосибирск, 02-06 декабря 2014 г.). – Новосибирск: НГТУ, 2014. – Ч. 1 – С. 25-28.
10. Savinykh, M.A. Active current transformer / M.A. Savinykh // Progress through innovation: тезисы городской научно-практической конференции аспирантов и магистрантов (Новосибирск, 2 апреля 2015 г.). – Новосибирск: НГТУ, 2015. – С. 57-58.
11. Савиных, М.А. Универсальный модуль дискретного ввода-вывода / М.А. Савиных // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых (Новосибирск, 01-05 декабря 2015 г.). – Новосибирск: НГТУ, 2015. – Ч. 1 – С. 36-38.
12. Савиных, М.А. Модуль дискретного ввода-вывода / М.А. Савиных // Измерение, контроль, информатизация: материалы XVI международной научно-технической конференции «ИКИ-2015» (Барнаул, 12 мая 2015 г.). – Барнаул: АлтГТУ, 2015. – С. 119-123.
13. Савиных, М.А. Автоматизированный стенд настройки и проверки функционирования счетчиков электроэнергии / М.А. Савиных // Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения: материалы международной научно-технической конференции (Севастополь, 5-9 сентября 2016 г.). – Севастополь: СевГУ, 2016. – С. 33-34.
14. Савиных М.А. Трансформатор тока в магнитном поле / Ю.А. Пасынков, М.А. Савиных // Молодой ученый. – 2017. – №24 (158). – С. 188-192.
15. Савиных М.А. Автоматизированная проверка функционирования контроллеров трехфазных счетчиков электроэнергии / Ю.А. Пасынков, М.А. Савиных // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов в 10 частях (Новосибирск, 04-08 декабря 2017 г.). – Новосибирск: НГТУ, 2017. – Ч. 1 – С. 30-34.