Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске

Ohur

На правах рукописи

Андреенков Евгений Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-35 кВ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель к.т.н., доц. Артемов А.И.

Смоленск – 2016 г.

оглавление

DDLLLIIIIL
1 Анализ зависимости погрешностей трансформаторов напряжения от
влияющих факторов и способов их компенсации 10
1.1 Общие сведения о трансформаторах напряжения 10
1.2 Оценка влияния воздействующих факторов на погрешности
измерительных трансформаторов16
1.3 Влияние погрешностей трансформаторов напряжения на результаты оценки качества электроэнергии
1.4 Анализ методов компенсации погрешностей ТН 22
2 Аналитическое исследование влияния нагрузки на величину погрешностей
трансформаторов напряжения
2.1 Основы расчета погрешностей измерительных трансформаторов
напряжения
2.2 Методика расчета погрешностей ТН в условиях эксплуатации 49
2.3 Уточнение погрешностей трехобмоточных трансформаторов
напряжения 55
3 Исследование погрешностей трансформаторов напряжения при
нелинейной нагрузке
3.1 Трансформатор напряжения как нелинейный элемент
3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник 67
3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник 67 3.3 Оценка добавочных потерь от высших гармоник в трансформаторах
 3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник 67 3.3 Оценка добавочных потерь от высших гармоник в трансформаторах напряжения и их вторичных цепях
 3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник 67 3.3 Оценка добавочных потерь от высших гармоник в трансформаторах напряжения и их вторичных цепях
 3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник 67 3.3 Оценка добавочных потерь от высших гармоник в трансформаторах напряжения и их вторичных цепях
 3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник 67 3.3 Оценка добавочных потерь от высших гармоник в трансформаторах напряжения и их вторичных цепях
 3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник
 3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник
 3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник
 3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник
 3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник
 3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник
 3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник
3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник
3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник
3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник

введение

Актуальность исследования. В последнее время в энергетике России возросли требования к точности учета и измерений потребляемой мощности в сетях среднего напряжения. Заменой индукционных счетчиков электрической энергии на электронные с более высоким классом точности часто не удается достигнуть требуемой точности. Одна из основных причин этого в том, что измерительные трансформаторы напряжения (TH) эксплуатируются за пределами допустимого ГОСТом диапазона изменений их номинальных параметров, что приводит к увеличению их погрешностей и, как следствие, искажению показаний счетчиков.

Проблема повышения точности учета электроэнергии получила актуальность в связи с ростом нагрузок ТН на существующих и новых подстанциях за счет подключения к ним не только систем учета электроэнергии, но и датчиков устройств телеизмерений и устройств релейной защиты и автоматики (РЗиА), что обусловило перевод их в более низкий класс точности.

Вместе с ростом нагрузок изменился и их характер. Нагрузка вторичных цепей ТН стала нелинейной. Нелинейные нагрузки помимо основной гармоники генерируют потоки энергии высших гармоник, которые увеличивают кажущуюся полную мощность, по величине которой и осуществляется оценка погрешностей ТН. Кроме того, нагрузка ТН стала приобретать активно-емкостной характер, в то время как согласно ГОСТ1983-2001 погрешности ТН нормируются при активно-индуктивной нагрузке с соѕф равном 0,8. Такое несоответствие не позволяет точно оценить класс точности ТН.

Возросло внимание и к качеству электрической энергии. Для измерения показателей качества электроэнергии требуется еще более точное измерение напряжения, которое не обеспечивается существующими ТН. Поэтому задача анализа погрешностей ТН, а также задача снижения этих погрешностей для повышения точности измерительных ТН, становятся актуальными.

В технически развитых странах для повышения точности измерения напряжения начали применять различные методы компенсации погрешностей TH, которые позволяют повысить нагрузочную способность TH до его максимальной мощности по условиям нагрева. В отсутствии правовой и методической основы в отечественной электроэнергетике этому вопросу не уделяется должного внимания, а предложенные технические решения несовершенны и требуют дополнительных исследований и доработок.

Степень разработанности. Вопросами, связанными с теорией возникновения погрешностей ТН, повышением их класса точности и, тем самым, улучшением условий работы подключенных к ТН приборов и реле, занимались как отечественные специалисты А.М. Дымков, А.Л. Гуртовцев, В.Н. Вавин, В.Е. Казанский, Р.Ф. Раскулов, Б.П. Варнавский, М.Х. Зихерман, А.С. Малый, А.И. Артемов и др., так и зарубежные D. Slomovitz, P. Sankaran, M. D'Apuzzo, M. Savastano, Y.C. Kang, A. Baccigalupi и др. Этими учеными разработана теория конструирования ТН, разработаны методы измерения погрешностей и их минимизации. Несмотря на полученные результаты, до настоящего времени не рассмотрены вопросы возникновения погрешностей ТН от нелинейных нагрузок, не отработаны методики оценки погрешностей в реальных условиях эксплуатации с принятием решений о возможности их использования для учета, измерения и оценки качества электроэнергии.

Объект исследования – погрешности измерительных трансформаторов напряжения в распределительных сетях 6-35кВ.

Предмет исследования – нагрузки ТН, возникновение погрешностей ТН при нелинейной нагрузке, повышение точности измерения напряжения, компенсация погрешностей электромагнитных ТН.

Цель работы – оценка характера нагрузок ТН в современных условиях эксплуатации и погрешностей ТН от нелинейной нагрузки для разработки рекомендаций по уточнению погрешностей ТН, находящихся в эксплуатации, и устройств автоматической компенсации погрешностей, обеспечивающих повышение нагрузочной способности и класса точности ТН.

Идея работы заключается в использовании аналитических исследований, математических моделей трансформаторов напряжения, а также результатов компьютерного моделирования для разработки методики оценки погрешностей измерения и оценки качества напряжения трансформаторами с нелинейной нагрузкой вторичной цепи, а также для разработки устройства автоматической компенсации погрешностей.

Задачи исследования.

1. Провести анализ характера нагрузок ТН от современных приборов учета, измерения, релейной защиты и автоматики в электрических сетях.

2. Исследовать процессы возникновения погрешностей ТН, в том числе многообмоточных, в режиме линейной и нелинейной нагрузки вторичных цепей

3. Разработать методику оценки фактических погрешностей ТН при измерениях и оценке качества напряжения с учетом характера нагрузок их вторичной цепи.

4. Представить алгоритм компенсации погрешностей ТН, в том числе многообмоточных, позволяющий компенсировать погрешности нагрузочные погрешности во всем допустимом диапазоне изменения влияющих факторов.

5. Разработать образец устройства автоматической компенсации погрешностей ТН и произвести его опытную проверку в лабораторных условиях и условиях промышленной эксплуатации.

Методы исследования. Научные и практические результаты диссертационной работы получены с использованием: фундаментальных положений теории электромагнитного поля, методов теории электрических цепей, теории расчета измерительных трансформаторов.

Теоретические исследования сопровождались разработкой математических моделей сопротивлений обмоток трансформатора и цепи намагничивания, которые использовались при реализации компьютерного моделирования.

Компьютерное моделирование процессов в ТН и в компенсирующем устройстве на основе разработанных алгоритмов компенсации проводилось в программном пакете NI Multisim (США). Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается проверкой теоретических выводов на имитационной модели схемы замещения ТН, а также экспериментальной проверкой в лаборатории кафедры электроэнергетических систем филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске с использованием измерительного комплекса производства НПП «Марс-Энерго» и промышленными испытаниями на подстанциях филиала ПАО «МРСК Центра» - «Смоленскэнерго».

Научная новизна.

1. Впервые проведена оценка влияния основных типов современного оборудования, включаемого во вторичные цепи ТН на гармонический состав токов во вторичных цепях.

2. Разработана методика определения погрешностей ТН при измерении величины и оценке показателей качества напряжения, отличающаяся тем, что позволяет рассчитать фактические погрешности ТН для любого числа гармоник тока вторичной цепи исходя из амплитуды и фазы гармонических составляющих.

3. Представлен алгоритм компенсации погрешностей TH, отличающийся от известных тем, что не требует включения дополнительных устройств в разрыв высоковольтной цепи первичной обмотки TH и позволяет обеспечить автоматическую компенсацию при изменении вторичной нагрузки TH любого характера в диапазоне, регламентированном ГОСТ.

4. Разработаны устройства автоматической компенсации погрешностей ТН различного исполнения и назначения, как новых, так и находящихся в эксплуатации, отличающиеся от известных тем, что обеспечивают возможность работы ТН в заданном классе точности при нагрузке, равной максимальной по условиям нагрева, т.е. при более эффективном расходе активных материалов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Использование обобщенной математической модели возникновения погрешностей ТН при холостом ходе и в режиме нагрузки позволяет установить аналитическую зависимость между конструктивными параметрами ТН и

величиной его вторичного напряжения при различных уровнях первичного напряжения и коэффициента загрузки.

2. Методика оценки погрешностей ТН от нелинейной нагрузки, в том числе ТН, используемых для измерения и оценки показателей качества электроэнергии позволяет определить фактический уровень их амплитудной и угловой погрешностей измерения напряжения с учетом характера нагрузки.

3. Разработанный алгоритм компенсации погрешностей ТН от протекания нагрузочных токов позволяет создавать устройства, компенсирующие погрешности измерения напряжения в распределительных сетях 6-35кВ трансформаторами в автоматическом режиме.

4. Разработанное устройство автоматической компенсации погрешностей позволяет значительно повысить нагрузочную способность и повысить класс точности ТН, что дает возможность снизить погрешность измерительного комплекса учета электроэнергии в распределительных сетях 6-35кВ.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

1. Разработанная методика расчета погрешностей ТН позволяет проводить оценку фактических погрешностей ТН, находящихся в условиях эксплуатации, с учетом и без учета высших гармонических составляющих исходя из параметров ТН, приводимых в его паспорте.

2. Представленный алгоритм компенсации погрешностей ТН может быть использован для разработки и настройки наиболее эффективных устройств автоматической компенсации погрешностей ТН.

3. Разработанные устройства автоматической компенсации погрешностей позволяют свести к минимуму погрешности ТН во всех режимах работы и значительно поднять их нагрузочную способность, вплоть до максимальной мощности, допустимой по условиям нагрева, что позволит отказаться от установки дополнительных ТН на подстанциях энергосистемы.

Реализация результатов работы. Разработанные в ходе диссертационного исследования методы и алгоритмы, использованы в качестве мероприятий для повышения надёжности, а также в качестве методов автоматизации в сетях 6-10 кВ

филиала ПАО «МРСК Центра» - «Смоленскэнерго» в рамках выполнения хоздоговорных НИР.

Результаты диссертационной работы внедрены в филиале ПАО «МРСК Центра» - «Смоленскэнерго», а также используются в учебном процессе на кафедре электроэнергетических систем филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение на следующих общероссийских и международных конференциях:

1. Х – XIII Международные научно-технические конференции студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика». Смоленский филиал «НИУ «МЭИ». Смоленск, 2013 – 2016г.

 III – V Международные научно-технические конференции «Энергетика, информатика, инновации». Смоленский филиал «НИУ «МЭИ». Смоленск, 2013 – 2015 г.

3. VII и VIII областные выставки научно-технического творчества молодежи «НТТМ Смоленск-2015» и «НТТМ Смоленск-2016».

4. Финал отбора по программе «УМНИК» в рамках 2-й научнопрактической конференции «Инновационные проекты молодых ученых Смоленской области».

5. Научный семинар кафедры ЭЭС филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске со специалистами филиала ПАО «МРСК Центра» - «Смоленскэнерго» по теме «Компенсация погрешностей ТН среднего напряжения».

6. II Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. Кемерово, 2015.

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объема исследований, изложенных в работе, в обработке, анализе, обобщении полученных результатов и формулировке выводов, а также в личном участии в апробации результатов исследования и подготовке основных публикаций по выполненной работе. **Опубликованные работы.** По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 3 в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Материал работы изложен на 133 страницах, включает 55 рисунков, 7 таблиц и 2 приложения. Список использованной литературы содержит 67 наименований.

В первой главе приведены общие сведения о ТН, краткая характеристика конструкций ТН и нагрузок их вторичных цепей. На основании литературных источников рассмотрена проблема компенсации погрешностей и способов её реализации в отечественной и зарубежной практике.

Вторая глава посвящена анализу теоретических основ возникновения погрешностей ТН, в том числе многообмоточных, а также исследованию влияния характера нагрузки на величину погрешностей ТН.

Третья глава посвящена анализу характера нагрузок вторичных цепей ТН и оценке погрешностей трёхфазных ТН от нелинейной нагрузки. Производится исследование влияния погрешностей ТН с нелинейной нагрузкой при измерениях и анализе качества электроэнергии. По результатам произведенных исследований приводится методика оценки амплитудной и угловой погрешностей ТН при нелинейной нагрузке его вторичных цепей.

Четвертая глава посвящена исследованию и разработке устройств автоматической компенсации погрешностей измерительных ТН. Производится разработка алгоритма компенсации погрешностей и описывается разработка устройств их автоматической компенсации.

1 Анализ зависимости погрешностей трансформаторов напряжения от влияющих факторов и способов их компенсации

1.1 Общие сведения о трансформаторах напряжения

Предметом исследования являются измерительные трансформаторы напряжения (TH), являющиеся наиболее важной составляющей частью структуры электротехнического комплекса и системы генерирования, преобразования, накопления, передачи и использования электрической энергии, электропривода и электроснабжения.

Измерительные трансформаторы напряжения обеспечивают преобразование переменного напряжения произвольного значения в переменное напряжение, приемлемое для измерения с помощью стандартных измерительных приборов, устройств защиты и автоматики, систем учета электроэнергии и контроля рабочих режимов цепи высокого напряжения.

Вопросы точности, достоверности, повторяемости результатов измерений параметров высоких напряжений сохраняют свою актуальность при оценке работоспособности высоковольтных цепей и блоков систем производства и распределения электроэнергии. При этом возникает необходимость в непрерывных измерениях амплитуды и формы электрического напряжения для оценки его качества, а также оценки переходных процессов в электроэнергетическом комплексе.

В системах электроэнергетического комплекса применяются различные типы измерительных ТН, которые подразделяются по ряду признаков:

- номинальное напряжение;
- класс точности
- назначение;
- категория размещения и климатическое исполнение;
- конструктивное исполнение, включающее вид изоляции, число обмоток, число фаз и т.д.;

Самое широкое применении нашли электромагнитные TH, но в последние годы расширяется область использования емкостных, электронных и оптоэлектронных конструкций TH.

Конструктивные особенности и вид изоляции обуславливают различные группы TH, но независимо от этого они характеризуются рядом общих параметров, которые определяют их назначение. Одним из основных таких параметров является класс точности, который согласно ГОСТ 1983-2001 [1] делит TH по назначению:

• TH, предназначенные для измерения, которые выбираются из классов 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0.

• ТН, предназначенные для включения устройств защиты, автоматики, управления, сигнализации и т.п., которые могут иметь класс точности ЗР или 6Р.

Трансформаторам присваивают один или несколько классов точности в зависимости от номинальной мощности и назначения. Для трехфазных трехобмоточных ТН классы точности устанавливают только для основной вторичной обмотки. Для однофазных трехобмоточных ТН устанавливают класс точности для обеих вторичных обмоток, причем для дополнительной вторичной обмотки класс точности может быть 3; 3Р или 6Р [1].

Согласно [1], для любого класса точности могут быть установлены следующие стандартные номинальные мощности: 10; 15; 25; 30; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 800; 1000; 1200 ВА.

Кроме этого, для каждого ТН устанавливается предельная мощность из ряда: 160; 250; 400; 630; 1000; 1600; 2000; 2500 ВА [1].

За номинальную мощность двухобмоточного ТН принимается мощность вторичной обмотки трансформатора. За номинальные и предельные мощности трехобмоточных ТН принимают суммарные мощности основной и дополнительной вторичных обмоток [1].

Номинальное напряжение первичной обмотки должно соответствовать классам напряжений по ГОСТ 1516.1-76 [2] и ГОСТ 1516.3-96 [3].

Согласно [1], номинальное напряжение основных вторичных обмоток должно быть 100 В – для однофазных ТН включенных на напряжение между

фазами и 100/√3 В для однофазных ТН, включенных на напряжение между фазой и землей (для экспортных ТН соответственно 110 В и 110/√3 или 120/√3 и по требованию 220 В или 220/√3 В).

Номинальные напряжения дополнительных вторичных обмоток должны быть:

100 В – для однофазных ТН, работающих в сетях с заземленной нейтралью;

100/3 В – для однофазных трансформаторов, работающих в сетях с изолированной нейтралью; для трансформаторов, предназначенных для экспорта, – соответственно 110 или 110/3 В, 120 или 120/3 В [1].

Номинальная частота сети 50 Гц или 60 Гц [1].

Трехфазные трансформаторы могут состоять из одного ТН или из группы двух и трех однофазных ТН, а антирезонансные – из четырех однофазных. В ТН составленных трехфазных трехобмоточных ИЗ группы однофазных, дополнительные вторичные обмотки включают по схеме разомкнутого треугольника, напряжение на выводах которого, при симметричном номинальном первичном напряжении, не должно превышать 3 В [1].

К каждой дополнительной обмотке группы однофазных TH, включенных по схеме, приведенной на рисунке 1.1, допускается включать нагрузку S_2 и общую нагрузку разомкнутого треугольника S_{Δ} . Схемы включения нагрузок на основные обмотки TH приведены на рисунках 1.2 и 1.3.

Суммарная мощность фазной нагрузки S_2 и общей нагрузки разомкнутого треугольника S_{Δ} при равенстве соѕ φ не должна превышать мощность дополнительной вторичной обмотки S_{don} (за расчетную схему принимается двухфазное короткое замыкание на землю) [1].

Трехфазные трансформаторы, а также трехфазные группы однофазных трансформаторов, предназначенные для контроля изоляции в сетях с изолированной нейтралью, должны выдерживать не менее 8 ч однофазные замыкания сети на землю при наибольшем рабочем напряжении, соответствующем ГОСТ 721 [4].



Рисунок 1.1 – Схема включения ТН и нагрузок к дополнительной обмотке ТН



Рисунок 1.2 – Соединение вторичной обмотки ТН и нагрузки Н в звезду с нулевым проводом N



Рисунок 1.3 – Соединение двух однофазных ТН по схеме неполного треугольника и нагрузки *Н* по схеме треугольника

Трансформаторы напряжения должны в течение 1 сек. выдерживать токи короткого замыкания, возникающего на выводах вторичных обмоток. По согласованию между потребителем и изготовителем в документации на ТН конкретных типов указываются величины этих токов между всеми вторичными выводами [1].

Метрологические характеристики ТН установлены для следующих рабочих условий применения трансформаторов [1]:

• частота переменного тока $(50 \pm 0,5)$ или $(60 \pm 0,5)$ Гц;

• мощность активно-индуктивной нагрузки при $\cos \varphi = 0.8$ находится в диапазоне от $0.25 S_{\mu} \left(\frac{U_{\mu}}{U_{\mu}}\right)^2$ до $S_{\mu} \left(\frac{U_{\mu}}{U_{\mu}}\right)^2$.

По согласованию с потребителем допускается более узкий диапазон мощности нагрузки, например, от $0.5S_n \left(\frac{U_1}{U_n}\right)^2$ до $S_n \left(\frac{U_1}{U_n}\right)^2$,

где S_{μ} – номинальная мощность трансформатора в данном классе точности, ВА; U_{μ} – номинальное значение первичного напряжения трансформатора, В; U_{I} - значение первичного напряжения, подведенного к трансформатору, В;

• первичное напряжение для трансформаторов, предназначенных для измерения, должно находиться в диапазоне (0,8-1,2) *U_n*; для трансформаторов, предназначенных для защиты, в диапазоне от 0,02 или 0,05 до 1,2; 1,5; 1,9*U_n*;

 температура окружающего воздуха – в соответствии со стандартами на ТН конкретных типов; и др.

Согласно [1], в эксплуатационной документации на ТН должны быть указаны зависимости погрешностей от влияющих факторов: первичного напряжения, мощности нагрузки, коэффициента мощности нагрузки, частоты напряжения, температуры окружающего пространства в диапазоне из рабочих значений, а также динамические характеристики.

Также должна быть указана точность определения зависимости погрешностей. Зависимости погрешностей от каждого влияющего фактора должны приводиться при номинальных значениях всех остальных влияющих факторов.

Кроме того, должны быть установлены изготовителем и указаны в эксплуатационной документации на TH такие параметры как ток холостого хода I_0 , сопротивление обмоток постоянному току и напряжение короткого замыкания U_{κ} .

Пределы допустимых погрешностей установлены в [1] и представлены в таблице 1.1.

Класс точности	Предел допускаемой погрешности		
	напряжения, %	угловой	
0,1	±0,1	±5′	±0,15 срад
0,2	±0,2	±10'	±0,3 срад
0,5	±0,5	±20'	±0,6 срад
1,0	±1,0	±40'	±1,2 срад
3,0	±3,0	Не нормируют	
3P	±3,0	±120′	±3,5 срад
6P	±6,0	±240′	±7,0 срад

Таблица 1.1 – Пределы допускаемых погрешностей ТН

Трансформаторы новых конструкций, в частности оптоэлектронные и емкостные, в настоящее время в российской энергосистеме распространены мало. Они постепенно начинают внедряться в схемах распределительных устройств (РУ) кВ, но будущее подстанций С номинальным напряжением выше 110 оптоэлектронных измерительных трансформаторов связывают с концепцией «Цифровая подстанция». Однако, данная концепция, предусматривающая применение в качестве первичных измерительных органов трансформаторов тока (ТТ) и напряжения с цифровым сигналом на выходе и полный отказ от использования традиционных аналоговых ТТ и ТН, по-прежнему остается на стадии опытного тестирования и далека от массового внедрения.

В тоже время, в схемах РУ 6-35 кВ электромагнитные измерительные трансформаторы, и в частности ТН, не имеют конкурентов в виде трансформаторов других типов. Это связано с тем, что стоимость трансформаторов новых типов значительно выше стоимости традиционных, отсутствует опыт их эксплуатации и обслуживания. Как правило, случаи внедрения новых типов ТН на отдельных ПС имеют статус опытных. Внедрение новых типов измерительных трансформаторов в схемах РУ 6-35 кВ следует ожидать лишь в рамках полноценного внедрения концепции «Цифровая подстанция». Поэтому электромагнитные ТН как в настоящее время, так и в ближайшем будущем не теряют своей актуальности.

Кроме того, ТН 6-35кВ являются наиболее многочисленными среди ТН всех типов, с помощью них осуществляется основная часть учета электроэнергии на высоком напряжении при расчетах между поставщиками и потребителями. Поэтому в рамках данной работы рассматриваются электромагнитные ТН, входящие в измерительные комплексы (ИК) в сетях 6-35 кВ.

1.2 Оценка влияния воздействующих факторов на погрешности измерительных трансформаторов

В условиях функционирования рыночной экономики требования к точности учета произведенной, отпущенной и потребленной электроэнергии существенно возросли. Для правильного учета электроэнергии её необходимо измерять с заданной точностью, которая регламентируется, в частности ЛЛЯ вновь и реконструируемых энергетических объектов, сооружаемых отраслевым документом РД 34.11.321-96 [5]. Оценка погрешностей измерений электроэнергии нормируется типовой инструкцией РД 34.09.101-94 [6], а также методикой выполнения измерений РД 34.11.333-97 [7]. В этих документах приводится алгоритм суммарной погрешности измерений электроэнергии расчета измерительными комплексами.

В сетях среднего напряжения измерительные комплексы включают в себя измерительные трансформаторы тока, измерительные трансформаторы напряжения, счетчики электроэнергии, а также провода, с помощью которых элементы ИК соединяются между собой. Погрешность измерения электроэнергии складывается из погрешностей средств измерений, входящих в ИК, и погрешностей от влияющих факторов. Составляющая погрешностей от влияющих факторов может оказаться значительной и существенно снизить точность измерений. Например, погрешности могут возрасти из-за отклонений от номинальных значений, температуры окружающей среды, частоты тока и напряжения сети, превышающих допустимый диапазон, предусмотренный стандартом на качество электроэнергии ГОСТ 32144-2013 [8], что показали исследования влияния воздействующих факторов, произведенные в ряде работ [9-12].

В условиях широкого внедрения электронных устройств учета, анализа качества электроэнергии, а также релейной защиты и автоматики, нагрузка TH цепей стала нелинейной, что привело вторичных к искажению синусоидальности кривых тока и напряжения во вторичной цепи ТН. Кроме того, нагрузка ТН стала приобретать активно-емкостной коэффициент мощности, в то время как согласно ГОСТ1983-2001 [1] погрешности ТН нормируются при активно-индуктивной нагрузке с соѕф равном 0,8. Такое несоответствие не позволяет точно оценить класс точности ТН.

Вопрос влияния на точность измерений электроэнергии искажений синусоидальности кривых измеряемых напряжения и тока поднимался в ряде работ [13, 14, 15, 16].

Статья [13] была опубликована ещё в первой половине XX в. В ней приводятся результаты исследований влияния третьей гармоники в спектре кривой тока на погрешность трансформаторов тока, по результатам которых был сделан вывод от том, что искажения синусоидальности кривой тока влияют на погрешности TT. Отмечено влияние угла фазового сдвига между основной и третьей гармониками тока на погрешность TT.

В публикации [16] приводится погрешностей методика расчета измерительных ТН при несинусоидальном первичном напряжении. Предлагаемая основывается зависимости коэффициента методика на использовании трансформации от активных и индуктивных сопротивлений схемы замещения ТН, законы изменения которых от частоты известны. Результаты расчетов показали хорошую сходимость с экспериментальными данными. Однако исследования функции изменения погрешностей ТН от гармонического состава первичного напряжения в статье не приводятся.

Результаты исследования влияния искажений формы кривых тока и напряжения на погрешности измерительных трансформаторов приводятся в публикации [15]. В рамках данного исследования рассматривались современные

ТТ и ТН с магнитопроводами, изготовленными из анизотропной холоднокатаной электротехнической стали. Опыты производились как на специальной установке, так и на обычных трансформаторах. Данные лабораторных экспериментов проверялись с помощью математического моделирования. В результате было нелинейных свойств статических установлено, что из-за характеристик магнитопроводов искажения формы входного сигнала влияют на коэффициент взаимоиндукции между первичной и вторичной обмотками, а, следовательно, и на величину ЭДС вторичной цепи ТН и тока во вторичной цепи ТТ. Наибольшее влияние на погрешности измерительных трансформаторов (ИТ) оказывает 3-я гармоника в спектре измеряемого сигнала. С ростом порядкового номера высших гармоник влияние их на погрешности ИТ снижается. Для ИТ с магнитопроводами из аморфных магнитных материалов, имеющих лучшие магнитостатические свойства по сравнению с холоднокатаными электротехническими сталями, искажения синусоидальности кривой входного сигнала до 30% практически не влияют на погрешности.

Влияние качества электроэнергии на погрешности ИТ исследуется также в публикации [14]. В качестве факторов, наиболее существенно влияющих на погрешности, рассматриваются несинусоидальность и несимметрия токов и напряжений. Амплитудная и угловая погрешности ИТ при наличии высших гармоник в первичной сети определяются как векторная сумма погрешностей на разных гармониках, что лишено физического смысла, так как суммировать векторы напряжений и токов разных гармоник нельзя. Таким образом определяется лишь действующее значение несинусоидальных токов и напряжений. По этой причине можно говорить лишь о погрешности ИТ на основной или любой другой гармонике, понятие результирующей погрешности лишено смысла. Аналогично оцениваются и погрешности при наличии несимметрии, как векторная сумма погрешностей прямой, обратной и нулевой последовательностей. И хотя такое суммирование имеет физический смысл, анализ погрешностей ИТ при несимметрии измеряемого напряжения должен проводиться отдельно для каждой При несимметрии фаз незачем анализировать какую-либо общую фазы.

погрешность, так как погрешности в каждой фазе будут разными и будут зависеть от нагрузки данной фазы. Следовательно, такой подход к оценке погрешностей следует считать ошибочным.

Точность передачи трансформаторами напряжения информации о параметрах высших гармоник при анализе качества электроэнергии требует специального рассмотрения, которое представляется в следующем разделе.

1.3 Влияние погрешностей трансформаторов напряжения на результаты оценки качества электроэнергии

В соответствие с законодательством РФ в области электроэнергетики каждый потребитель имеет право на получение качественной электроэнергии с необходимой степенью надежности.

Многочисленные государственные стандарты в области электромагнитной совместимости [8, 17 и др.] направлены на создание условий для обеспечения электромагнитной совместимости технических средств, что включает в себя и обеспечение необходимого качества электроэнергии. Сертификация электрической энергии предусматривается на соответствие требованиям ГОСТ 32144-2013 [8] по основным показателям качества электроэнергии (ПКЭ) (отклонение частоты, медленные изменения напряжения, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям).

В сетях свыше 1 кВ непосредственное включение приборов контроля ПКЭ в высоковольтную сеть невозможно, их включают в сеть через измерительные трансформаторы напряжения. В результате, на результаты контроля и анализа качества электроэнергии существенное влияние оказывают метрологические характеристики TH.

Измерения и анализ ПКЭ должны проводиться в диапазоне до 40-й гармоники включительно [8], а значит исследование амплитудно-фазовой

частотной характеристики (АФЧХ) ТН для оценки точности передачи высокочастотного сигнала является необходимым и актуальным.

При этом ставится задача не только измерить и оценить ПКЭ, но и определить виновника ухудшения ПКЭ и оценить его вклад в такое ухудшение. Существует два способа определения виновника ухудшения показателей качества электроэнергии [18]:

- измерение ПКЭ до включения потребителя и после включения потребителя. Этот способ обладает одним существенным недостатком - необходимостью полного отключения потребителя, что практически невозможно сделать для потребителей с мощностью более 1МВт.

- определение направлений потоков энергии высших гармоник. Способ основан на измерении гармонических фазовых углов между токами и напряжениями соответствующих гармоник. В зависимости от того, в каком квадранте находятся векторы, определяется виновник искажения ПКЭ. Способ применим ко всем потребителям.

Согласно РД 153-34.0-15.501-00 [19] неравномерность АЧХ ТН в полосе частот до 2 кГц не должна превышать 2 %, а коэффициенты *n-х* гармонических составляющих напряжения до 40-й включительно на выходе ТН при подаче на его вход синусоидального напряжения частотой 50 Гц должны быть не более 0,02 %, то есть измерительный трансформатор не должен искажать форму измеряемого напряжения. При определении направлений потоков мощности высокие требования должны предъявляться и к погрешности измерения фаз *n-х* гармонических составляющих, однако в нормативной документации таких требований в настоящий момент нет.

Согласно экспериментальным исследованиям [18, 20] АФЧХ ТН, находящихся в эксплуатации, их амплитудные погрешности в диапазоне до 40-й гармоники не выходят за пределы нормированного значения 2% и с ростом нагрузки уменьшаются. Угловые погрешности ТН с ростом номера гармоники увеличиваются. В режиме холостого хода они не превышают 1 эл. град, однако при номинальной нагрузке могут достигать 7,5 эл. град. Искажения, вносимые TH в

форму испытательного напряжения частотой 50 Гц, не превышают погрешность измерительного комплекса.

По результатам исследований [18, 20] сделан вывод: исследованные ТН удовлетворяют нормативным требованиям, что позволяет применять их при контроле качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [8]. Но при использовании их для анализа качества электроэнергии уже необходимо вносить соответствующие поправки в результаты измерений фаз *n-х* гармонических составляющих. Причем, из-за заметного влияния нагрузки на угловые погрешности, для введения поправок необходимы АЧХ ТН, измеренные на месте их эксплуатации при фактической нагрузке.

Следует отметить, что в работах [18, 20] исследования АФЧХ производились лишь на двух трансформаторах типа НОМ устаревшей конструкции с шихтованным магнитопроводом, а в качестве нагрузки использовалось линейное активное сопротивление с $\cos \phi = 1,0$. Однако, нагрузка TH в современных условиях приобретает нелинейный характер, что приводит к значительному искажению формы тока во вторичной цепи. Несинусоидальность вторичного тока может приводить к искажению и формы кривой вторичного напряжения. А это значит, что вторичного обусловленным К высшим гармоникам напряжения, несинусоидальностью первичного напряжения будут добавляться высшие гармоники, обусловленные нелинейностью нагрузки самого ТН, а значит по форме вторичного напряжения уже нельзя судить о форме первичного. Поэтому приобретает актуальность вопрос о возможности применения трансформаторов напряжения с нелинейной нагрузкой его вторичной цепи для оценки качества электроэнергии.

Таким образом, исследования влияния качества измеряемого напряжения и других факторов на погрешности ИТ и в частности ТН проводились неоднократно. Несмотря на полученные результаты, до настоящего времени не рассмотрены вопросы формирования погрешностей ТН от нелинейных нагрузок, не отработаны методики оценки погрешностей в реальных условиях эксплуатации ТН с двумя и более вторичными обмотками с принятием решений о возможности их

использования для учета, измерения и оценки качества электроэнергии. Поэтому задача оценки погрешностей ТН от несинусоидального тока во вторичной цепи является актуальной.

1.4 Анализ методов компенсации погрешностей ТН

Стоимость ТН высокой точности при большой нагрузке его вторичных цепей заметно возрастает (порой в несколько раз от стоимости ТН низкого класса). В то же время очень точный и недорогой ТН может быть построен без необходимости использовать большое количество активных материалов (медь, сталь).

Желание обеспечить высокую точность измерения и повысить нагрузку вторичной цепи в заданном классе точности, уменьшить затраты на сооружение и эксплуатацию электроустановок стимулировали поиск новых технических решений и применение устройств компенсации погрешностей ТН. Такие работы проводились и выполняются в настоящее время, как в нашей стране, так и за рубежом.

Для снижения погрешностей ТН используются различные методы, которые условно разделены на два вида: технологический и структурный [21]. Технологический основан на тщательном выборе ТН и обеспечении работы его в оптимальном по точности диапазоне измерений, освобождая вторичные цепи от избыточных нагрузок. Этот путь обычно связан с заметными материальными затратами.

Структурный путь основан на методах компенсации (ручной или автоматической) погрешностей и введении поправок в результаты измерений на величину систематической погрешности и др. Этот путь требует проведения предварительных исследований, диагностирование погрешностей и других метрологических характеристик ТН и учет их в окончательных результатах измерения в виде поправочных коэффициентов. Это эффективнее, чем технологический путь. Среди методов компенсации погрешностей наибольшее распространение получил метод витковой коррекции, описанный к примеру, в [22, 23] и используемый при изготовлении ТН. Коррекцию выполняют таким образом, чтобы при холостом ходе трансформатор имел некоторую положительную погрешность (в пределах заданного класса точности), т. е. несколько увеличивают вторичное напряжение. Для этого необходимо увеличить число витков вторичной обмотки, но на практике вместо этого обычно уменьшают число витков первичной обмотки, так как при этом коррекция может быть осуществлена более точно.

При введении такой коррекции погрешности напряжения при изменении нагрузки будут иметь как положительные, так и отрицательные знаки, что позволяет уменьшить абсолютное значение погрешностей в диапазоне изменения нагрузок от 0 до *I*_{*µ*}.

Кроме коррекции амплитуды напряжения, также часто требуется введение и угловой коррекции. Коррекция угловой погрешности не может быть выполнена у однофазных трансформаторов, но может быть осуществлена у трехфазных трансформаторов напряжения. Первичная обмотка трехфазных трансформаторов напряжения обычно соединяется в звезду. Для осуществления угловой коррекции соединение в нейтраль производится посредством дополнительных компенсационных обмоток, расположенных на соседних фазах и включаемых последовательно с основными ветвями звезды. Таким образом, получается схема, подобная схеме «зигзага» с неравными плечами, как это показано на рисунке 1.4 *а*. Эта схема применяется в трансформаторах напряжения серии HTMK.

Схема (рисунок 1.4 a), применяемая для первичной обмотки, дает положительную компенсацию, т.е. она компенсирует отрицательную угловую погрешность. На векторной диаграмме (рисунок 1.4 e), соответствующей схеме на рисунке 1.4 a, векторы XA, YB и ZC сдвинуты относительно их первоначального положения OA', OB', OC' (при отсутствии компенсации) против направления их вращения. Эта схема применяется в тех случаях, когда средние расчетные значения угловой погрешности получаются отрицательными. Угол между вектором OB' и

отрезком *OB* является угловой коррекцией $\Delta \theta_K$ трехфазного трансформатора напряжения.



Рисунок 1.4 – Компенсация угловой погрешности для трехфазного двухобмоточного трансформатора напряжения:

а - принципиальная схема обмотки ВН для получения положительной компенсации угловой погрешности; *б* - то же для получения отрицательной компенсации; *в* - векторная диаграмма к схеме *а*

Если угловые погрешности по расчету получаются положительными, угловая коррекция $\Delta \theta_K$ должна быть отрицательной. Для перемены знака коррекции необходимо изменить последовательность схемы соединения «зигзаг», т. е. применяется схема, как на рисунке 1.4 *б*.

Погрешность TH, при работе в высшем для него классе точности, будет иметь знакопеременный характер – при малых нагрузках погрешность будет положительная, а при нагрузках, близких к номинальной, – отрицательная. При работе TH в низких классах точности эффективность витковой коррекции снижается в несколько раз, что является недостатком данного метода.

Витковая коррекция позволяет полностью компенсировать погрешности холостого хода ТН, но не позволяет эффективно компенсировать нагрузочные погрешности более чем на величину положительной области допустимого диапазона погрешностей в заданном классе точности. Поэтому данный способ должен находить совместное применение со способами компенсации нагрузочных погрешностей.

Предложения [24, 25] рассчитать систематические погрешности ТН с реальными предварительно измеренными нагрузками его вторичных цепей и учесть их в виде поправочного коэффициента не нашли своего применения по причинам, недостаточности законодательной и методической базы. Кроме этого в методах расчета погрешностей ТН имеется методическая погрешность из-за неверного учета влияния изменений первичного напряжения на систематические погрешности ТН.

Наиболее эффективными (не требующими заметных материальных затрат) являются методы, основанные на компенсации погрешностей ТН с помощью дополнительных устройств, устанавливаемых во вторичных цепях ТН [21]. Такие методы широко применяются во всем мире, однако в электроэнергетике России при учете электроэнергии они до сих пор не нашли своего применения. Хотя попытки внедрения имеются [26 – 33], для их широкого внедрения не создана достаточная законодательная база, методическое обеспечение и оборудование.

Одним из первых методов компенсации погрешностей ТН, которые получили внедрение в отечественной практике, является применение батарей конденсаторов (БК) компенсирующих реактивную составляющую токов нагрузки ТН [26, 29].

Предлагается специальное симметрирующее устройство, состоящее из четырех конденсаторов. Схема устройства приведена на рисунке 1.5. Конденсаторы, включенные на фазные напряжения, компенсируют токи нулевой последовательности нагрузки, а конденсаторы, включенные на линейные напряжения, компенсируют токи обратной последовательности нагрузки и токи конденсаторов, включенных на фазные напряжения. Методика выбора фаз и емкостей конденсаторов подробно изложена в [26, 29].

Так как класс точности ТН определяется по наиболее загруженной его фазе, то выравнивание нагрузки по фазам ТН уменьшает его систематические погрешности измерения и тем самым улучшает условия работы подключенных к данному ТН приборов и реле. Симметрирование нагрузки так же позволяет полностью использовать мощность ТН в заданном классе точности и отказаться от установки второго ТН.



Рисунок 1.5 – Схема подключения компенсирующих устройств для компенсации токов обратной и нулевой последовательности нагрузки TH

Устройство (рисунок 1.5) не только выравнивает токи нагрузки фаз, но частично компенсирует их реактивную (индуктивную) составляющую. Для полной компенсации реактивных токов и компенсации его погрешностей в [27, 30] предлагается дополнительно включить на линейные напряжения емкость C_3 (см. схему на рисунке 1.6).

Специальным подбором емкостей нагрузки для каждого TH создается режим, в котором погрешности в учете электроэнергии, обусловленные погрешностями TH по напряжению и угловыми погрешностями, будут компенсировать друг друга.

Ток вторичной цепи ТН после компенсации принимает значение I_{κ} , угол сдвига φ_{20} соответствует заданному оптимальному значению [27, 30].



Рисунок 1.6 - Схема подключения компенсирующих конденсаторов *C* (*a*) и векторная диаграмма (б) тока *I*₂ нагрузки ТН и емкостного тока *I*_C

Так как при компенсации реактивной составляющей тока нагрузки, не скомпенсированной остается погрешность ТН от активной составляющей тока нагрузки, компенсация этой отрицательной амплитудной погрешности достигается за счет создания положительной угловой погрешности ТН.

Однако данный подход в значительной степени устарел. Прежде всего по причине того, что при разработке данного способа симметрирования в качестве основной нагрузки TH 6 кВ рассматривались обмотки напряжения индукционных счетчиков активной энергии, подключаемые на междуфазные напряжения U_{AB} и U_{BC} , и являющиеся для TH нагрузкой индуктивного характера. Однако в настоящее время для учета электроэнергии применяются электронные счетчики, включаемые на все междуфазные напряжения, и представляющие собой нагрузку емкостного характера (с углом φ близким к 90°), так как их электронные блоки питания, как правило, строятся по схеме емкостного делителя. Большое число счетчиков в составе нагрузки TH приводит к тому, что даже с учетом различных реле и устройств РЗиА нагрузка TH приобретает в целом емкостной характер. Однако не стоит забывать, что и в цепях РЗиА в настоящее время всё шире применяются электронные устройства с блоками питания на полупроводниковой базе. Соответственно применение конденсаторов для компенсации несимметрии такой нагрузки оказывается невозможным.

По результатам опытного внедрения данного метода компенсации погрешностей на действующих подстанциях в числе других недостатков была отмечена необходимость заново рассчитывать и вручную настраивать блок компенсирующих конденсаторов при каждом существенном изменении нагрузки ТН [27]. Это требует проведения комплекса довольно сложных измерений и расчетов, а значит и персонала высокой квалификации. Указанные причины привели к тому, что в настоящее время применение БК в цепях ТН во многих энергосистемах сокращено.

В зарубежной практике получили распространение электронные схемы, с включением электронных элементов в разрыв цепи вторичной нагрузки ТН [34 – 38]. Рассмотрим несколько таких схем. К примеру, в [34] рассматривается вариант повышения точности ТН за счет применения усилителя и вспомогательного трансформатора.



Рисунок 1.7 – Принципиальная схема электронной компенсации погрешностей трансформатора напряжения

Предлагаемая схема показана на рисунке 1.7. TH_2 - вспомогательный TH с коэффициентом трансформации, как у трансформатора TH_1 , который имеет нагрузку Z_n . Напряжение на входных зажимах усилителя равно разности между напряжением \dot{U}_n на нагрузке и вторичным напряжением $\dot{U}_{2(2)}$ TH_2 , чья вторичная цепь по существу разомкнута так как работает на усилитель с высоким входным сопротивлением. Усилитель обеспечивает выходное напряжение \dot{U}_a которое добавляется последовательно к рабочему напряжению $\dot{U}_{2(1)}$ TH_1 в целях обеспечения необходимого напряжения на нагрузке Z_n . При достаточно большом коэффициенте усиления, выходное напряжение \dot{U}_n , тем самым уменьшая амплитудную и угловую погрешность напряжения на нагрузке.

В рассматриваемой схеме вспомогательный ТН лишен нагрузочных потерь и выполняет роль источника опорного напряжения, с которым сравнивается напряжение на нагрузке. Вспомогательный трансформатор должен быть рассчитан на то же напряжение U_1 , что и основной трансформатор, а значит и стоимость такого ТН будет сопоставима со стоимостью основного ТН, что в схемах, рассчитанных на первичное напряжение 6 кВ и выше, приведет к значительному удорожанию.

Дальнейшее совершенствование схем было связано с поиском оптимального способа получения опорного напряжения без использования вспомогательного трансформатора. В [35] Даниелем Сломовицем предлагается схема, приведенная на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 – Принципиальная схема компенсации

В данной схеме T – маломощный вспомогательный трансформатор тока, который трансформирует и суммирует первичный и вторичный токи I_1 и I_2 обмоток TH. Операционный усилитель формирует на сопротивлениях R и L напряжение вольтодобавки V_0 пропорциональное суммарному току I_5 . Сопротивления R и Lпропорциональны соответственно активному и индуктивному сопротивлениям обмоток TH.

Однако такая схема рассчитана на компенсацию маломощных TH с небольшим коэффициентом трансформации. Необходимость включения обмотки N_3 на высокий потенциал первичной обмотки усложняет и удорожает выполнение ее изоляции.

Позднее Даниель Сломовиц предлагает схему [36], где компенсация погрешностей первичной и вторичной обмоток выполняется отдельными электронными блоками без вспомогательных трансформаторов (см. рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Принципиальная схема компенсации:

а) Компенсирующее устройство первичной обмотки. б) Компенсирующее устройство вторичной обмотки

Схема компенсации погрешностей первичной обмотки (см. рисунок 1.9 *a*) включает в себя конденсатор *C*, служащий для компенсации индуктивности рассеяния первичной обмотки (L_p) и электронное отрицательное сопротивление, выполненное с помощью операционных усилителей (ОУ), служащее для компенсации активного сопротивления обмотки (R_p) . При выборе значений этих сопротивлений равными $-R_p$ и $-\omega L_p$, суммарные активное и реактивное сопротивное сопротивления получаются нулевыми на частоте сети. Таким образом, этот метод устраняет источник погрешности первичной обмотки.

Для компенсации погрешностей во вторичной цепи ТН предлагается иная схема (рисунок 1.9 δ) Это объясняется тем, что конденсатор *C* в этом случае должен иметь очень большую емкость.

Такая схема не требует применения дополнительных обмоток и сердечников для ТН, может быть применена для компенсации трансформаторов стандартной конструкции, рассчитанных на высокие первичные напряжения. Однако следует отметить, что включение компенсирующих устройств в разрыв первичной обмотки приводит к необходимости выполнения работ на высоковольтной стороне ТН, что носит характер повышенной опасности. Включение компенсирующих устройств в разрыв вторичной обмотки обуславливает ограничение тока вторичной обмотки пропускной способностью электронного устройства компенсации, а значит ограничивает мощность нагрузки ТН и снижает надежность вторичной цепи в целом. Еще одно устройство компенсации рассматривается в [37] (см. схему на рисунке 1.10). Особенностью данной схемы является применение датчика тока специальной конструкции, представляющего собой трансформатор, у которого вторичная цепь разомкнута. ЭДС e_{2A} на выходе вторичной обмотки у него пропорциональна производной первичного тока i_1 . На вход компенсирующей цепи подается напряжение e_{2A} и его интеграл, который равен производной тока i_1 . Интегрирующее устройство фильтрует входной сигнал и делает создание компенсирующего напряжения менее чувствительным к шуму, а значит более надежным. Значения коэффициентов усиления K_1 и K_2 определяются величинами индуктивного и реактивного сопротивлений первичной обмотки.



Рисунок 1.10 – Структурная схема компенсирующей цепи

Как и для схем, рассмотренных ранее, для данного варианта характерно включение компенсирующего устройства В разрыв цепи И протекание нагрузочного тока непосредственно через электронный блок компенсирующего устройства. Такой подход объясняется тем, что в зарубежной практике принято TH устанавливать отдельные маломощные на каждое присоединение потребителей. Нагрузочный ток у таких трансформаторов весьма небольшой. В отечественной практике такой подход не нашел применения и один ТН устанавливается на целую секцию сборных шин ПС. Это приводит к тому, что отечественные ТН рассчитаны на значительно большие мощности, а к их надежности предъявляются более жесткие требования, так как выход из строя одного ТН повлечет за собой выход из строя систем защит и учета всех

присоединений на секции. Поэтому рассмотренные схемы компенсации, в исходном виде не применимы для отечественных ТН.

Среди отечественных разработок известна конструкция трансформатора напряжения [39], в котором часть витков вторичной обмотки пропускается через специальные отверстия в магнитопроводе, в результате чего эти витки охватывают только часть сечения магнитопровода. В этом случае величина погрешности по трансформатора напряжению такого зависит OT величины нагрузки трансформатора. При малой величине нагрузки число витков вторичной обмотки определяется числом витков, охватывающих полное сечение магнитопровода, а при полной нагрузке число витков вторичной обмотки определяется числом витков, включающем в себя и те витки, которые охватывают только часть сечения магнитопровода, что приводит к увеличению вторичного напряжения и, следовательно, уменьшению погрешности.

Однако такой трансформатор обладает недостатками. Он может быть изготовлен только с использованием шихтованных магнитопроводов, которые собраны пластин с проштампованными отверстиями. Применение ИЗ лентой магнитопроводов, намотанных ИЗ ферромагнитного материала, недопустимо, так как при выполнении сквозных отверстий в поверхности магнитопровода будет происходить замыкание слоев ленты, которое приведет к увеличению потерь холостого хода и тока намагничения магнитопровода. Кроме того, такой способ компенсации погрешностей может быть осуществлен только в процессе изготовления трансформатора.

Для уменьшения погрешности трансформаторов напряжения, находящихся в эксплуатации и с любым типом магнитопровода, разработана конструкция вспомогательного ТН [40], принцип работы которого аналогичен выше рассмотренному. Первичная обмотка вспомогательного ТН подключается к низковольтным выводам измерительной обмотки компенсируемого ТН. Коэффициент трансформации вспомогательного ТН должен быть равен единице, а магнитопровод и вторичная обмотка выполняются таким образом, чтобы во всем допустимом диапазоне измеряемых напряжении и во всем диапазоне допустимых

нагрузок, абсолютное значение погрешности по напряжению было примерно равно абсолютному значению погрешности компенсируемого трансформатора, но с противоположным знаком.

Магнитопровод дополнительного трансформатора, содержит два или более сердечника, намотанных из ферромагнитной ленты, которые прикладываются один к одному торцевыми поверхностями и отделяются друг от друга прокладками из немагнитного материала. Вторичная обмотка наматывается на магнитопровод, собранный из отдельных сердечников, так что некоторая часть витков, проходящая через сквозное отверстие в прокладках из немагнитного материала, охватывает только часть сечения магнитопровода, как показано на рисунке 1.11.



Рисунок 1.11 – Конструкция вспомогательного ТН для уменьшения погрешностей ТН, находящихся в эксплуатации

Принцип работы такого ТН подробно описывается в [40]. Основным недостатком данного способа компенсации погрешностей является то, что дополнительный трансформатор должен иметь ту же мощность, что и компенсируемый ТН, а значит и их стоимость будет сопоставима. Указанный факт не позволяет говорить о возможности массового внедрения таких устройств.

На кафедре ЭЭС Смоленского филиала МЭИ было предложено компенсировать погрешности ТН с помощью вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) [41 – 42]. Так как амплитудная погрешность ТН при нагрузке носит

линейный характер и зависит только от величины нагрузки, то компенсировать её с использованием вольтодобавочных устройств достаточно просто.

Учитывая, что в трехфазной сети электросчетчики включаются на линейные напряжения, и согласно ГОСТу 1983-2001 [1] устанавливается допустимая погрешность в измерении линейных напряжений (по модулю ΔU ,% и по углу δ_{θ}), то для регулирования подводимых к счетчикам напряжений, ВДТ достаточно включать в две фазы – А и С. При этом изменяются напряжения U_{AB} и U_{BC} , а напряжение U_{CA} формируется автоматически, как векторная разность двух первых напряжений.

Чтобы одновременно компенсировать амплитудную и угловую погрешности TH, необходимо добавку напряжения $\Delta U_{\mathcal{A}}$ ВДТ регулировать по амплитуде и по фазе. Регулирование фазы $\Delta U_{\mathcal{A}}$ можно осуществлять комбинацией напряжений различных фаз. В рамках предложенной методики разработан вариант включения первичных обмоток ВДТ на линейные напряжения (U_{AB} и U_{BC}), а вторичных обмоток в разрыв двух фаз (A и C) вторичной цепи TH (рисунок 1.12) [41].



Рисунок 1.12 – Схема подключения 4-х ВДТ для компенсации погрешностей ТН

На рисунке 1.13 приведена векторная диаграмма, иллюстрирующая данный способ компенсации погрешностей (ΔU_{CB} и $\Delta \delta_{CB}$) применительно к погрешностям измерения линейного напряжения U_{CB} .

Вольтодобавочный трансформатор ВДТ1С формирует продольную составляющую вольтодобавки E_{d1} (по оси *d* совпадающую с линейным напряжением U_{CB}), равную вторичной ЭДС этого ВДТ:

$$E_{d1} = E_1 = \frac{U_{CB}}{K_1} \, .$$

Вольтодобавочный трансформатор ВДТ2С, включенный на линейное напряжение *U*_{AB}, формирует ЭДС *E*₂:

$$E_2 = \frac{U_{AB}}{K_2},$$

которая раскладывается на поперечную составляющую E_{q2} (отрезок перпендикулярный оси d) и продольную составляющую E_{d2} .



Рисунок 1.13 – Векторная диаграмма вольтодобавок, компенсирующих погрешности измерений U_{CB} (пунктиром при отрицательном $\Delta \delta$)

Поперечная составляющая E_{q2} компенсирует угловую погрешность $\Delta \delta_{CB}$.

Для компенсации амплитудной погрешности ΔU_{CB} необходимо сложить продольные составляющие E_{d1} и E_{d2} со своими знаками и получить суммарную продольную составляющую E_d , равную ΔU_{CB} :

$$E_{d1} + E_{d2} = \Delta U_{CB}.$$

Тогда, необходимую величину ЭДС *E*₁ ВДТ 1С можно определить следующим образом:

$$E_1 = E_{d1} = \Delta U_{CB} - E_{d2}.$$

При этом должны быть учтены знаки погрешностей ТН (ΔU_{CB} и $\Delta \delta_{CB}$) и в соответствии с ними сформированы знаки ЭДС ВДТ.

Вторичные обмотки ВДТ должны быть рассчитаны на величину нагрузочного тока ТН. Но так как вторичная ЭДС ВДТ определяется только величиной вольтодобавки и составляет единицы процентов от U_{2hom} ТН, мощность ВДТ будет составлять не более 10% мощности компенсируемого ТН.

Возможность построить вольтодобавочное устройство с ручным управлением (переключением отпаек ВДТ) для формирования нужной добавки была проверена и испытана на одной из подстанций ОАО «МРСК Центра» -«Смоленскэнерго» в 2007 г. [41]. Ко вторичной цепи ТН типа НТМИ-10, установленного на вводе одной из секций шин, параллельно существующей нагрузке было подключено вольтодобавочное устройство, на выход которого был В результате включен счетчик электроэнергии. сравнения показаний существующего счетчика и счетчика, подключенного к ВДТ было установлено, что недоучет электроэнергии составил 0,67%. Подключение расчетных счетчиков к ТН через ВДТ позволило бы исключить данный недоучет.

Основным недостатком такого решения является необходимость рассчитывать и вручную настраивать блок вольтодобавочных трансформаторов при каждом существенном изменении нагрузки ТН. Это требует проведения сложных измерений и расчетов. В частности, приходится на каждом TH измерять активное сопротивление обмоток, ток холостого хода и его фазу, а также вычислять Z_{k3} по данным опыта короткого замыкания. Поэтому наличие этих данных, а также величины коэффициента витковой компенсации в документации на TH позволило бы значительно упростить такие расчеты.

Исключить указанный недостаток позволит разработка блока вольтодобавочных трансформаторов с автоматической настройкой компенсации, которая рассматривается в данной работе. Внедрение электронных устройств контроля и управления, позволяющих осуществлять регулирование напряжения с высокими энергетическими показателями происходит в последние годы во многих отраслях промышленности. Наличие такого устройства позволит изготовить TH более компактным, рассчитанным только на максимальную нагрузку без обеспечения необходимого класса точности. Функции обеспечения необходимого
класса точности в этом случае возлагаются на автоматический компенсатор погрешностей, который должен стать неотъемлемой частью ТН. Поэтому задача разработки новых способов и устройств компенсации погрешностей ТН, работающих в автоматическом режиме, является актуальной.

Выводы:

1. Несмотря на то, что исследования влияния качества измеряемого напряжения и других факторов на погрешности ИТ и в частности ТН проводились неоднократно, не рассмотрены вопросы возникновения погрешностей ТН от нелинейных нагрузок, не отработаны методики оценки погрешностей в реальных условиях эксплуатации ТН с принятием решений о возможности их использования для учета, измерения и оценки качества электроэнергии.

2. Задача компенсации погрешностей ТН рассматривалась локально для определенных типов ТН и при определенных видах нагрузки. В то же время в условиях эксплуатации, факторы, влияющие на появление погрешностей ТН, могут проявляться в разной степени и порой случайно. Задача разработки устройства, реагирующего на эти изменения, и автоматически компенсирующего погрешности измерений, является актуальной.

3. По различным причинам до сих пор не разработано устройство компенсации погрешностей, которое было бы пригодно для использования в реальных условиях применения стандартных ТН и при любом характере нагрузок, работающее в автоматическом режиме.

2 Аналитическое исследование влияния нагрузки на величину погрешностей трансформаторов напряжения

2.1 Основы расчета погрешностей измерительных трансформаторов напряжения

Электрическая схема двухобмоточного трансформатора напряжения приведена на рисунке 2.1 [43]. На схеме введены следующие обозначения: \dot{U}_1 – напряжение, подаваемое на первичную обмотку с числом витков w_1 , $Z_{1o\delta}$ – полное сопротивление первичной обмотки, $Z_{2o\delta}$ – полное сопротивление вторичной обмотки с числом витков w_2 , $Z_{2\mu}$ – полное сопротивление нагрузки, \dot{U}_2 – напряжение на нагрузке, \dot{I}_1 и \dot{I}_2 – токи в первичной и вторичной цепях соответственно.



Рисунок 2.1 – Электрическая схема двухобмоточного трансформатора

Напряжение, подаваемое на первичную обмотку, \dot{U}_1 уравновешивается падением напряжения на первичной обмотке $\dot{I}_1 Z_{1ob}$, где $Z_{1ob} = r_{1ob} + j x_{1ob}$, и электродвижущей силой (ЭДС), индуцируемой в первичной обмотке $-\dot{E}_1$:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{1o\delta} + (-\dot{E}_1) \tag{2.1}$$

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{1o\delta} - n \dot{E}_2 \,. \tag{2.2}$$

При этом:

$$\dot{E}_1 = n\dot{E}_2, \qquad (2.3)$$

где $\dot{E}_2 - ЭДС$ во вторичной обмотке; $n = w_1/w_2$ – номинальный коэффициент трансформации; $r_{1o\delta}$ – активное сопротивление первичной обмотки; $x_{1o\delta}$ – реактивное сопротивление первичной обмотки.

Источником напряжения во вторичной обмотке является ЭДС \dot{E}_2 , которая уравновешивается падениями напряжения на вторичной обмотке $\dot{I}_2 Z_{2ob}$ и на нагрузке $\dot{I}_2 Z_{2n}$:

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 Z_{2o\delta} + \dot{I}_2 Z_{2u}.$$
(2.4)

Обозначим:

$$\dot{I}_2 = -n\dot{I}_2'$$
 (2.5)

и подставим в (2.4), тогда получим:

$$\dot{E}_2 = -n\dot{I}_2' Z_{2o\delta} - n\dot{I}_2' Z_{2\mu} \,. \tag{2.6}$$

Подставим полученное выражение в уравнение (2.2):

$$\dot{U}_{1} = \dot{I}_{1} Z_{1o\delta} + n^{2} \dot{I}_{2}' Z_{2o\delta} + n^{2} \dot{I}_{2}' Z_{2u}.$$
(2.7)

Введем обозначения:

$$\dot{Z}_{2o\delta}' = n^2 \dot{Z}_{2o\delta} \tag{2.8}$$

$$\dot{Z}_{2n}' = n^2 \dot{Z}_{2n}.$$
 (2.9)

Тогда уравнение (2.7) принимает вид:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{10\delta} + \dot{I}_2' Z_{20\delta}' + \dot{I}_2' Z_{2\mu}'.$$
(2.10)

Уравнение (2.10) можно рассматривать как первое уравнение эквивалентной схемы трансформатора напряжения (рисунок 2.2) с приведенными параметрами вторичной цепи \dot{I}'_{2} , $Z'_{2o\delta}$, Z'_{2h} . Вторым уравнением эквивалентной схемы трансформатора является:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{1o\delta} + \dot{I}_0 Z_0 \,. \tag{2.11}$$

Причем, сравнивая (2.11) и (2.1) получаем:

$$-\dot{E}_2 = \dot{I}_0 Z_0, \qquad (2.12)$$

где \dot{I}_0 – ток намагничивания, Z_0 – полное сопротивление цепи намагничивания.

Третьим уравнением эквивалентной схемы трансформатора напряжения является уравнение токов:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2'. \tag{2.13}$$



Рисунок 2.2 – Эквивалентная электрическая схема двухобмоточного трансформатора напряжения

Подставим в уравнение (2.4) приведенные значения токов и сопротивлений, которые определяются выражениями (2.5), (2.8) и (2.9):

$$-n\dot{E}_{2} = \dot{I}_{2}'Z_{2o\delta}' + \dot{I}_{2}'Z_{2u}'.$$
(2.14)

Сопоставляя уравнения (2.14) и (2.4), приведенное значение ЭДС можно записать в виде:

$$\dot{E}_2' = -n\dot{E}_2. \tag{2.15}$$

Аналогичные выражения можно получить для падения напряжения U'_2 . Таким образом, из соотношений (2.5) и (2.15) можно сделать вывод, что векторы приведенных токов и напряжений повернуты относительно действительных векторов на 180°.

Построим векторную диаграмму трансформатора напряжения для синусоидальных токов и напряжений (см. рисунок 2.3). Сначала на диаграмме отложим векторы ЭДС \dot{E}_1 и \dot{E}_2 , имеющие одинаковые направления. Угол между вторичным током и ЭДС \dot{E}_2 составляет α_2 . В соответствии с уравнением (2.4) покажем векторы падения напряжения на вторичной обмотке $\dot{U}_{2o\delta} = \dot{I}_2 Z_{2o\delta}$ и на нагрузке $\dot{U}_{2n} = \dot{I}_2 Z_{2n}$. Активные составляющие падения напряжения $\dot{I}_2 r_{2n}$ и $\dot{I}_2 r_{2o\delta}$ направлены вдоль вектора \dot{I}_2 , а реактивные составляющие $\dot{I}_2 x_{2n}$ и $\dot{I}_2 x_{2o\delta}$ перпендикулярно вектору \dot{I}_2 .

Из рисунка 2.3 следуют следующие соотношения:

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{x_{2\mu} + x_{2o\delta}}{r_{2\mu} + r_{2o\delta}}, \qquad (2.16)$$

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{x_{2_H}}{r_{2_H}},\tag{2.17}$$

где φ_2 – угол между вектором \dot{I}_2 и падением напряжения на нагрузке \dot{U}_2 .



Рисунок 2.3 – Векторная диаграмма трансформатора напряжения для синусоидальных токов и напряжений

Модуль полного сопротивления нагрузки z_{2h} (Ом):

$$z_{2\mu} = \sqrt{r_{2\mu}^2 + x_{2\mu}^2} . \tag{2.18}$$

При этом:

$$r_{2\mu} = z_{2\mu} \cos \varphi_2, \qquad (2.19)$$

$$x_{2\mu} = z_{2\mu} \sin \varphi_2 \,. \tag{2.20}$$

Модуль полного сопротивления вторичной цепи:

$$z_2 = \sqrt{\left(r_{2_{H}} + r_{2_{0}\bar{0}}\right)^2 + \left(x_{2_{H}} + x_{2_{0}\bar{0}}\right)^2} .$$
(2.21)

В соответствии с законом электромагнитной индукции [43]:

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_2 S \frac{dB}{dt},$$
 (2.22)

где *S* – площадь поперечного сечения магнитопровода. После решения дифференциального уравнения (2.24) получаем

$$B = \frac{E_{2m}}{\omega S w_2} \cos \omega t = B_m \cos \omega t , \qquad (2.23)$$

При этом $e_2 = E_{2m} \sin \omega t$, где $\omega = 2\pi f$. Следовательно, вектор магнитной индукции \dot{B} и магнитного потока Φ_0 направлены под углом 90° к вектору ЭДС \dot{E}_2 . Поэтому отложим вектор магнитной индукции \dot{B} на векторной диаграмме перпендикулярно вектору ЭДС \dot{E}_2 (рисунок 2.3).

Для действующего значения ЭДС $E_2 = E_{2m}/\sqrt{2}$ из уравнения (2.23) получаем

$$E_2 = \sqrt{2}\pi f B_m S w_2 = 4,44 f w_2 B_m S . \qquad (2.24)$$

Реактивная составляющая тока намагничивания \dot{I}_{0p} параллельна вектору магнитной индукции \dot{B}_0 , а активная составляющая тока намагничивания \dot{I}_{0a} перпендикулярна вектору \dot{B}_0 . Угол потерь ψ определяют из соотношения:

$$\sin\psi = \frac{I_{0a}}{I_0}$$
. (2.25)

Из закона полного тока для С-образного магнитопровода [44]:

$$Hl_{cp} = I_0 w_1, (2.26)$$

где *H* – действующее значение напряженности магнитного поля, А/м; *l_{cp}* – средняя длина магнитного пути магнитопровода, м.

$$l_{cp} = \frac{D_H + D_B}{2}, \qquad (2.27)$$

где D_H – наружный диаметр магнитопровода, м; D_B – внутренний диаметр магнитопровода, м.

Для магнитного материала магнитопровода из справочных данных [44] можно взять формулу для удельных магнитных потерь *P* (Вт/м³) в виде:

$$P = rf^{p}B_{m}^{s}, \qquad (2.28)$$

где *r*, *p* и *s* – коэффициенты функции аппроксимации удельных потерь в магнитопроводе в зависимости от индукции, и кривые намагничивания при фиксированной частоте *f* следующего вида [44]:

$$H_m = \alpha B_m^{\nu}, \qquad (2.29)$$

где H_m – максимальное значение напряженности магнитного поля, $H_m = \sqrt{2} \cdot H$, α , ν – коэффициенты аппроксимации.

Угол потерь ψ можно определить, если потери в обмотках значительно меньше потерь в магнитопроводе. В этом случае ЭДС на первичной обмотке $\dot{E}_1 = -\dot{U}_1$, а потери в магнитопроводе $\dot{I}_{0a}\dot{U}_1$. Удельные магнитные потери в магнитном материале *P* (Вт/м³) можно записать в виде [45]:

$$P = \frac{I_{0a}U_1}{V},$$
 (2.30)

где V — объем стали магнитопровода, м³; $U_1 = \sqrt{2}\pi f B_m S w_1$. Это позволяет преобразовать (2.25) к виду:

$$\sin\psi = \frac{P}{\pi f B_m H_m} = \frac{P}{S}, \qquad (2.31)$$

где *S* – удельная полная намагничивающая мощность, BA/м³ [44]:

$$S = \pi f B_m H_m. \tag{2.32}$$

Используя соотношения (2.28) и (2.29) можно найти угол потерь ψ из формулы (2.31) при заданных значениях f и B_m .

Вектор тока в первичной обмотке \dot{I}_1 наносится на векторную диаграмму в соответствии с уравнением (2.13), учитывая, что вектор приведенного тока \dot{I}_2 повернут на 180° относительно вектора \dot{I}_2 . Напряжение, подаваемое на первичную обмотку, \dot{U}_1 наносится с учетом уравнений (2.1) и (2.2), причем ток в первичной обмотке \dot{I}_1 можно разделить на две составляющие - ток намагничивания \dot{I}_0 и ток нагрузки \dot{I}_{1n} :

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_{1n}. \tag{2.33}$$

Ток нагрузки \dot{I}_{ln} соответствует той части первичного тока, на которую он увеличивается, чтобы компенсировать размагничивающее действие вторичного тока. Сравнивая (2.36) с (2.3) получаем, что $\dot{I}_{1n} = \dot{I}'_2$, то есть ток нагрузки \dot{I}_{ln} равен приведенному току во вторичной обмотке \dot{I}'_2 . Тогда в соответствии с (2.33) и (2.1) получаем:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 Z_{1o\delta} + \dot{I}_2' Z_{1o\delta} + (-\dot{E}_1).$$
(2.34)

Нанесем соответствующие векторы падения напряжений от нагрузочного тока $\dot{I}'_2 Z_{1o\delta}$ и от тока намагничивания $\dot{I}_0 Z_{1o\delta}$ с учетом направления векторов \dot{I}'_2 и \dot{I}_0 . При этом активные составляющие падения напряжения на первичной обмотке $\dot{I}'_2 r_{1o\delta}$ и $\dot{I}_0 r_{1o\delta}$ направлены вдоль векторов \dot{I}'_2 и \dot{I}_0 соответственно, а реактивные составляющие $\dot{I}'_2 x_{1o\delta}$ и $\dot{I}_0 x_{1o\delta}$ перпендикулярны этим векторам.

Вектор – \dot{E}_{l} согласно (2.3) и (2.15) совпадает с вектором \dot{E}'_{2} , который согласно (2.14) и (2.15) определяется суммой векторов падений напряжения на сопротивлении вторичной обмотки $\dot{I}'_{2}Z_{2o\delta}$ и на сопротивлении нагрузки $\dot{I}'_{2}Z_{2\mu}$.

Погрешность измерения напряжения ΔU (%) определяется по формуле [22]:

$$\Delta U = \frac{nU_2 - U_1}{U_1} 100, \qquad (2.35)$$

где коэффициент 100 выражает погрешность ΔU в процентах к U_1 . Угловая погрешность трансформатора напряжения δ (град) – это угол между вектором первичного напряжения \dot{U}_1 и вектором вторичного напряжения \dot{U}_2 повернутым на 180° (или между \dot{U}_1 и вектором приведенного вторичного напряжения \dot{U}'_2 , поскольку $\dot{U}'_2 = -n\dot{U}_2$). Погрешности измерения удобно разделить на две части:

$$\Delta U = \Delta U_0 + \Delta U_{\mu}, \qquad (2.36)$$

$$\delta = \delta_0 + \delta_u, \qquad (2.37)$$

где ΔU_0 – погрешность измерения напряжения на холостом ходу; ΔU_{μ} – погрешность измерения напряжения, связанная с током нагрузки; δ_0 – угловая погрешность на холостом ходу; δ_{μ} – угловая погрешность, связанная с током нагрузки.

Как видно из рисунка 2.3 погрешность ΔU_0 холостого хода TH не зависит от его нагрузки, а значит, она может быть скомпенсирована витковой коррекцией (изменением коэффициента трансформации K_T), что будет показано ниже, поэтому анализ погрешностей TH от нагрузки его вторичной цепи можно проводить без учета погрешностей холостого хода.

В режиме холостого хода, когда $I_2 = 0$:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0,$$
 (2.38)

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 Z_{1o\delta} + \dot{I}_0 Z_0 = \dot{I}_0 (Z_{1o\delta} + Z_0), \qquad (2.39)$$

то есть ток в первичной обмотке \dot{I}_1 является током холостого хода, и он равен току намагничивания \dot{I}_0 . Векторная диаграмма трансформатора напряжения на холостом ходу представлена на рисунке 2.4. На холостом ходу $\dot{E}_2 = \dot{U}_2$. Тогда:

$$n\dot{U}_2 - \dot{U}_1 = n\dot{E}_2 - \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{U}_1.$$
(2.40)

Погрешность измерения напряжения на холостом ходу

$$\Delta U = \frac{-E_1 - U_1}{U_1} 100 = -100 \frac{I_0 r_{lo\delta} \sin \psi + I_0 x_{lo\delta} \cos \psi}{U_1} .$$
(2.41)

Синус угловой погрешности на холостом ходу

$$\sin \delta_0 = \frac{h}{U_1} = \frac{I_0 r_{1o\delta} \cos \psi - I_0 x_{1o\delta} \sin \psi}{U_1}.$$
 (2.42)

Для небольших углов $\sin \delta_0 = \delta_0$, поэтому

$$\delta_0 = 3440 \frac{I_0 r_{1o\delta} \cos \psi - I_0 x_{1o\delta} \sin \psi}{U_1}, \qquad (2.43)$$

где коэффициент 3440 = 360·60/2π (мин/рад) приводит размерность угловой погрешности к минутам.

$$\Delta U_0 = -\frac{100I_0}{U_1} (r_{1o\delta} \sin \psi + x_{1o\delta} \cos \psi), \qquad (2.44)$$

$$\delta_0 = \frac{3440 I_0}{U_1} (r_{100} \cos \psi - x_{100} \sin \psi), \qquad (2.45)$$

а после учета формул (2.26) и (2.28) получаем:

$$\Delta U_0 = -100 \frac{\alpha B_m^{\nu} l_{cp}}{\sqrt{2} U_1 w_1} \left(r_{1o\delta} \sin \psi + x_{1o\delta} \cos \psi \right), \qquad (2.46)$$

$$\delta_{0} = 3440 \frac{\alpha B_{m}^{\nu} l_{cp}}{\sqrt{2} U_{1} w_{1}} (r_{1o\delta} \cos \psi - x_{1o\delta} \sin \psi), \qquad (2.47)$$

то есть с увеличением числа витков первичной обмотки снижается погрешность измерительного трансформатора напряжения на холостом ходу.



Рисунок 2.4 – Векторная диаграмма трансформатора напряжения на холостом ходу

Зависимости потерь в магнитопроводе и намагничивающей мощности от напряжения определяют характер связи погрешностей холостого хода от напряжения (индукции). Величина потерь в магнитопроводе и намагничивающей мощности, зависит от конструкции магнитопровода, марки электротехнической стали, а, следовательно, и от удельных потерь и удельной намагничивающей

мощности в магнитопроводе. В [22] приведены сравнительные кривые удельных значений этих величин для C-образного и шихтованного магнитопроводов в зависимости от индукции в реальных рабочих диапазонах работы ТН. Потери в стали теоретически пропорциональны квадрату индукции – это подтверждается графиками для обоих типов магнитопроводов. Намагничивающая мощность в стали Q в шихтованном магнитопроводе возрастает в третьей степени от индукции, а у C-образных магнитопроводов близка к квадратичной зависимости. В ещё большей степени удельная намагничивающая мощность возрастает в воздушном зазоре.

Как показано в [10], суммарная намагничивающая мощность в шихтованном магнитопроводе при малых индукциях ($U_1 = 0, 8U_n$) складывается поровну (в зазоре и в стали), а при повышенных напряжениях мощность в зазоре больше намагничивающей мощности в стали. Расчеты показывают, что погрешность TH типа HOM-35 (шихтованный магнитопровод) в режиме XX при изменении напряжения в диапазоне $0,8-1,2U_n$ меняется и зависит от первичного напряжения U_1 . Для TH с *C*-образным ленточным магнитопроводом мощность потерь и намагничивающая мощности близки к квадратичной зависимости от индукции, поэтому можно предположить, что погрешность XX таких TH должна мало зависеть от изменения величины первичного напряжения U_1 . Это подтверждено исследованиями [10] на TH типа 3HOЛ-0,6 класса 0,5.

В современных ТН применяются ленточные магнитопроводы типа *C*, в таких ТН можно достаточно эффективно компенсировать погрешность холостого хода витковой коррекцией, суть которой изложена в первой главе.

Рассмотрим формирование погрешностей при протекании через вторичную обмотку тока нагрузки. Для небольших углов δ разность $n\dot{U}_2 - \dot{U}_{1h}$ приблизительно равна разности проекций векторов $\dot{U'}_2 = -n\dot{U}_2$ и \dot{U}_{1h} на ось \dot{E}_1 , где \dot{U}_{1h} – часть падения напряжения на первичной обмотке, связанная с током нагрузки \dot{I}_{1h} . В этом случае из свойств прямоугольных треугольников можно записать (см. рисунок 2.3):

$$\Delta U_{n} = -\frac{\left(nI_{2}r_{2o\delta} + \frac{I_{2}}{n}r_{1o\delta}\right)\cos\alpha_{2} + \left(nI_{2}x_{2o\delta} + \frac{I_{2}}{n}x_{1o\delta}\right)\sin\alpha_{2}}{U_{1}}100, \qquad (2.48)$$

где $nI_2r_{2o\delta}$ – активное падение напряжения на вторичной обмотке, приведенное к первичной цепи; $nI_2x_{2o\delta}$ – реактивное падение напряжения на вторичной обмотке, приведенное к первичной цепи; $\frac{I_2}{n}r_{1o\delta}$ – активное падение напряжения на первичной обмотке, связанное с током нагрузки; $\frac{I_2}{n}x_{1o\delta}$ – реактивное падение напряжения на первичной обмотке, связанное с током нагрузки. При этом $I'_2 = \frac{-I_2}{n}$ и $I_{1n} = I'_2$.

Угловую погрешность, связанную с током нагрузки также можно найти из рисунка 2.3:

$$\delta_{n} = 3440 \frac{\left(nI_{2}r_{2o\delta} + \frac{I_{2}}{n}r_{1o\delta}\right)\sin\alpha_{2} - \left(nI_{2}x_{2o\delta} + \frac{I_{2}}{n}x_{1o\delta}\right)\cos\alpha_{2}}{U_{1}}.$$
 (2.49)

Угловая погрешность считается положительной, если вторичное напряжение \dot{U}_{2}^{\prime} опережает первичное напряжение \dot{U}_{I} , и отрицательной, если вторичное напряжение отстает от первичного напряжения (как на рисунке 2.3).

Формулы (2.48) и (2.49) можно преобразовать к виду:

$$\Delta U_{\mu} = -\frac{100I_{2}}{nU_{1}} \left[\left(n^{2}r_{2o\delta} + r_{1o\delta} \right) \cos \alpha_{2} + \left(n^{2}x_{2o\delta} + x_{1o\delta} \right) \sin \alpha_{2} \right] =$$

$$= -\frac{100I_{2}}{nU_{1}} \left[\left(r_{2o\delta}' + r_{1o\delta} \right) \cos \alpha_{2} + \left(x_{2o\delta}' + x_{1o\delta} \right) \sin \alpha_{2} \right], \qquad (2.50)$$

$$\delta_{\mu} = \frac{3440I_{2}}{nU_{1}} \left[\left(n^{2}r_{2o\delta} + r_{1o\delta} \right) \sin \alpha_{2} - \left(n^{2}x_{2o\delta} + x_{1o\delta} \right) \cos \alpha_{2} \right] =$$

$$= \frac{3440I_{2}}{nU_{1}} \left[\left(r_{2o\delta}' + r_{1o\delta} \right) \sin \alpha_{2} - \left(x_{2o\delta}' + x_{1o\delta} \right) \cos \alpha_{2} \right]. \qquad (2.51)$$

Ток во вторичной обмотке I2 можно найти из уравнения (2.4):

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{z_2},$$
 (2.52)

где *z*₂ – модуль полного сопротивления вторичной цепи (см. формулу (2.21)).

В случае, если модуль полного сопротивления вторичной обмотки $z_{2o\delta} \ll z_{2\mu}$, то $\alpha_2 = \varphi_2$ и формулы (2.50) и (2.51) принимают вид:

$$\Delta U_{\mu} = -\frac{100I_2}{nU_1} [(r'_{2o\delta} + r_{1o\delta}) \cos \varphi_2 + (x'_{2o\delta} + x_{1o\delta}) \sin \varphi_2], \qquad (2.53)$$

$$\delta_{_{H}} = \frac{3440I_2}{nU_1} \left[\left(r'_{2o\delta} + r_{1o\delta} \right) \sin \varphi_2 - \left(x'_{2o\delta} + x_{1o\delta} \right) \cos \varphi_2 \right].$$
(2.54)

Таким образом, погрешности измерения трансформатора, связанные с током нагрузки, пропорциональны току нагрузки $I_{1n} = \frac{-I_2}{n}$ и определяются суммой падений напряжения от этого тока на активных и индуктивных сопротивлениях обмоток трансформатора. Погрешность измерения напряжения тем больше, чем выше сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора. Линейная зависимость амплитудной и угловой погрешностей TH от тока нагрузки показана на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Зависимость погрешностей амплитудной (а) и угловой (б) ТН ЗНОЛ.06-10 от нагрузки β

2.2 Методика расчета погрешностей ТН в условиях эксплуатации

Однако, для того чтобы определить фактическую величину погрешности ТН в условия эксплуатации, пользоваться формулами (2.53) и (2.54) неудобно, так как они включают в себя величины активных и индуктивных сопротивлений обмоток, которые в паспорте на ТН не указываются. Рассмотрим возможность упрощения формул расчета нагрузочных погрешностей ТН. При протекании тока нагрузки геометрическая сумма векторов падений напряжения в сопротивлениях первичной и вторичной обмоток составляет полное падение напряжения, называемое (при протекании тока нагрузки \dot{I}_{2m} максимального по условиям нагрева) напряжением короткого замыкания трансформатора – \dot{U}_{κ} [43], которое определяется следующим выражением (см. рисунок 2.6):

$$\dot{U}_{\kappa} = \dot{I}'_{2m} Z'_{2o\delta} + \dot{I}'_{2m} Z_{1o\delta} = \dot{I}'_{2m} (Z_{1o\delta} + Z'_{2o\delta}) = \dot{I}'_{2m} Z_{12o\delta}, \qquad (2.55)$$

ИЛИ

$$\dot{U}_{\kappa} = \dot{I}'_{2m} (r_{1o\delta} + r'_{2o\delta}) + j \dot{I}'_{2m} (x_{1o\delta} + x'_{2o\delta}).$$
(2.56)



Рисунок 2.6 – Векторная диаграмма нагрузочных потерь трансформатора напряжения

Активные падения напряжения $\dot{I}'_2(r_{1o\delta} + r'_{2o\delta})$ возникают вследствие электрических (джоулевых) потерь в обмотках и в сумме составляют основную часть потерь короткого замыкания трансформатора ΔP_{κ} , а индуктивные падения напряжения $\dot{I}'_2(x_{1o\delta} + x'_{2o\delta})$ зависят от индуктивности трансформатора.

Из векторной диаграммы (рисунок 2.6) после упрощения формул (2.53) и (2.54) с учетом выражений (2.55) и (2.56) погрешности ТН при максимальной вторичной нагрузке *I*_{2m} можно определить по следующим простым зависимостям:

$$\Delta U_{\mu} = -\frac{100I_2}{nU_1} \left[\left(r'_{2o\delta} + r_{1o\delta} \right) \cos \varphi_2 + \left(x'_{2o\delta} + x_{1o\delta} \right) \sin \varphi_2 \right] = -U_{\kappa} \cos(\alpha_2 - \varphi_z) = -U_{\kappa} \cos \gamma , \quad (2.57)$$

$$\delta_{\mu} = 3 \frac{3440I_2}{nU_1} \left[\left(r'_{2o\delta} + r_{1o\delta} \right) \sin \varphi_2 - \left(x'_{2o\delta} + x_{1o\delta} \right) \cos \phi_2 \right] = 34.4 \cdot U_{\kappa} \sin(\alpha_2 - \varphi_z) = 34.4 \cdot U_{\kappa} \sin \gamma , (2.58)$$

где γ – угол сдвига вектора \dot{U}_{κ} от вертикальной оси координат, $\gamma = \alpha_2 - \varphi_z$; φ_z – угол полного сопротивления трансформатора:

$$\varphi_{z} = \operatorname{arctg} \frac{x_{1o\delta} + x'_{2o\delta}}{r_{1o\delta} + r'_{2o\delta}} \,. \tag{2.59}$$

В случае, если модуль полного сопротивления вторичной обмотки $z_{2o\delta} \ll z_{2h}$, то $\alpha_2 = \varphi_2$ и формулы (2.57) и (2.58) принимают вид:

$$\Delta U_{\mu} = -U_{\kappa} \cos(\varphi_2 - \varphi_z) = -U_{\kappa} \cos\gamma, \qquad (2.60)$$

$$\delta_{\mu} = 34.4 \cdot U_{\kappa} \sin(\varphi_2 - \varphi_z) = 34.4 \cdot U_{\kappa} \sin\gamma. \qquad (2.61)$$

Учитывая, что потери напряжения пропорциональны току нагрузки I_2 , то и погрешности можно оценивать в долях от максимальной нагрузки $\beta = \frac{I_2}{I_{2m}}$ или

 $\beta = \frac{S_2}{S_{2m}}$. Тогда погрешности ТН в общем виде можно записать следующими

соотношениями:

$$\Delta U_{\mu} = -U_{\kappa}\beta\cos\gamma, \qquad (2.62)$$

$$\delta_{\mu} = 34.4 \cdot U_{\kappa} \beta \sin \gamma \,. \tag{2.63}$$

Знак угловой погрешности определяется соотношением углов φ_2 и φ_2 [22].

Если $\varphi_2 = \varphi_z$, тогда $\gamma = 0$, $\delta_{\mu} = 0$, т.е. вектор U'_2 совпадает по фазе с вектором U_1 , что соответствует нулевой угловой погрешности от нагрузки вторичной цепи.

Если $\varphi_2 > \varphi_z$, тогда $\gamma > 0$, $\delta_{\mu} > 0$, т.е. вектор U'_2 опережает вектор U_1 , что соответствует положительной угловой погрешности.

Если $\varphi_2 < \varphi_z$, тогда $\gamma < 0$, $\delta_{H} < 0$, т.е. вектор U'_2 отстает от вектора U_1 , что соответствует отрицательной погрешности.

Погрешности ТН с ростом нагрузки β изменяются линейно, причем наклон линий зависит от величины U_{κ} %, и γ .

Напряжение короткого замыкания обычно представляют в % от номинального напряжения, тогда погрешности напряжения ТН в % получаются при подстановке в (2.62) U_{κ} в %, а угловая погрешность, выраженная в минутах, получается при умножении δ_{μ} на коэффициент 34,4 переводящий радианы в минуты.

Потери ΔP_{κ} и напряжение короткого замыкания U_{κ} % являются важными эксплуатационными характеристиками трансформаторов и для силовых трансформаторов их приводят в технических характеристиках. В ГОСТе на TH [1] рекомендуется вносить в техническую документацию эти параметры, но фактически изготовителями такая информация не указывается.

При отсутствии паспортных данных U_{κ} %, φ_{z} или $Z_{12o\delta}$ их можно определить из опытов холостого хода и короткого замыкания.

В [25] предлагается определять параметры TH из опытов холостого хода (XX) и короткого замыкания (K3), путем подачи напряжения на вторичную обмотку, а не на первичную, как в традиционных опытах. В ходе опыта XX предлагается измерять величины I_x и P_x и по ним вычислять угол φ_x и остальные параметры TH:

$$\cos\varphi_x = \frac{P_x}{I_x U_{2\mu}}.$$
(2.64)

где U_{2n} – номинальное напряжение вторичной обмотки TH, B; $I_x = I_0$ – ток холостого хода TH, A; P_x – потери холостого хода TH, Bт.

В опыте КЗ действующее напряжение короткого замыкания U_{κ} в вольтах подается на вторичную обмотку, а первичная замкнута накоротко, при этом ток I_2

должен принять значение I_{2m} , после чего можно определить процентное содержание U_{κ} % и рассчитать ее активную и реактивную составляющие:

$$U_{\kappa},\% = \frac{U_{\kappa}}{U_{2\mu}} 100\%, \qquad (2.65)$$

Реактивная составляющая U_{κ} :

$$U_{pm} = \frac{I_{2m} (x'_{1o\delta} + x_{2o\delta})}{U_{2\mu}} 100\% = \sqrt{U_{\kappa}^2 - U_{am}^2}, \qquad (2.66)$$

где x'_{1об} – реактивное сопротивление первичной обмотки, приведенное ко вторичной обмотке; U_{am} – активная составляющая U_{κ} .

$$x'_{1o\delta} = \frac{x_{1o\delta}}{n^2} \,. \tag{2.67}$$

Причем, реактивное сопротивление первичной и вторичной обмоток принимаются одинаковыми $x'_{1ob} = x_{2ob}$, то есть:

$$U_{p10\delta} = U_{p20\delta} = I_{2m} x'_{10\delta} = 0.5 U_{pm}.$$
(2.68)

$$U_{am} = \frac{I_{2m}(r_{1o\delta}' + r_{2o\delta})}{U_{2\mu}} 100\%, \qquad (2.69)$$

где $r_{2o\delta}$ – измеренное активное сопротивление вторичной обмотки TH, Ом; $r'_{1o\delta}$ – активное сопротивление первичное обмотки, приведенное ко вторичной обмотке:

$$r_{1o\delta}' = \frac{r_{1o\delta}}{n^2}, \qquad (2.70)$$

где r_{1ob} – сопротивление первичной обмотки, которое приводится в паспорте, Ом.

Во ВНИИ метрологии и стандартных образцов (г. Екатеринбург) осуществлен анализ методической погрешности в оценке параметров ТН из-за применения пониженных напряжений в нетрадиционных опытах XX и K3, который показал, что при $\cos\varphi_2 \ge 0.8$ погрешность очень мала и только при $\cos\varphi_2 < 0.03$ недопустимо велика [25].

Было установлено, что при использовании измерительных приборов классов от 0,1 до 0,5 погрешность значений параметров TH, снятых по опытам XX и K3 позволяет определить расчетным путем погрешности TH по этим параметрам. При этом погрешность расчета не превышает: $(7,3\div7,87) \pm (0,82\div1,01)$ % для амплитудной погрешности и $(8,18\div10,1) \pm (1,0\div1,52)$ % для угловой погрешности, при сличении их с образцовыми ТН. Это вполне приемлемая точность для оценок погрешностей в условиях эксплуатации, т.к. при классе точности ТН 0,5 его дополнительная погрешность составит примерно ± 0,04%. Такая методика проведения опытов ХХ и КЗ позволяет более безопасно их проводить в условиях эксплуатации, так как нет необходимости отключать цепи высоковольтной обмотки ТН от сети.

Возможность расчетов погрешностей ТН при наличии параметров ТН: U_{κ} % и φ_z показана на примере материалов исследований [46, 47] выполненных для ТН типа ЗНОЛ.06 -10.

Из соотношений (2.60) – (2.63) видно, что угол φ_2 сдвига между напряжением U_2 и током нагрузки вторичной цепи TH I_2 входит в формулы погрешностей его как угловой, так и напряжения, поэтому ГОСТ на TH устанавливает класс их точности при $\cos\varphi_2 = 1,0$ и 0,8. В реальных нагрузках TH $\cos\varphi_2$ отличается от этих значений, поэтому необходимой является оценка влияния $\cos\varphi_2$ на формирование погрешностей TH.

Из (2.60) – (2.61) ΔU_{μ} и δ_{μ} можно записать в следующем виде.

$$\Delta U_{\mu} = -U_{\kappa} (\cos\varphi_2 \cos\varphi_z - \sin\varphi_2 \sin\varphi_z), \qquad (2.71)$$

$$\delta_{\mu} = 34.4 \cdot U_{\kappa} (\sin \varphi_2 \cos \varphi_z - \cos \varphi_2 \sin \varphi_z). \qquad (2.72)$$

Из полученных выражений видно, что ΔU_{μ} и δ_{μ} зависят от $\cos\varphi_2$ (sin φ_2).

Характер такой зависимости представлен на рисунке 2.7 для ТН типа ЗНОЛ.06-10 без учета витковой коррекции и погрешностей ХХ ТН. Для учета этих поправок необходимо ось соsq₂ переместить на величину коррекции. Для этого случая шкала погрешностей представлена на рисунке 2.7 *а* справа.

Из графиков видно, что если мощность нагрузки TH равна или ниже предела нижней нагрузки $(0,25I_{2h})$ то изменение $\cos\varphi_2$ оказывает незначительное влияние на погрешность TH и при изменении $\cos\varphi_2$ от 0,7 для активно-емкостной нагрузки до 0,15 для активно-индуктивной нагрузки угловые погрешности TH не выходят за пределы допустимой величины.



Рисунок 2.7 – Зависимость погрешностей напряжения (а) и угловой (б) ТН ЗНОЛ.06-10 от созф2

2.3 Уточнение погрешностей трехобмоточных трансформаторов напряжения

Согласно ГОСТу на ТН [1], за номинальные и предельные мощности трехобмоточных трансформаторов принимаются *суммарные* мощности основной и дополнительной вторичных обмоток.

Так как в трехобмоточных ТН все обмотки находятся на одном магнитопроводе, при подключении нагрузки на дополнительную обмотку падение напряжения в первичной обмотке возрастает, а значит погрешность основной (измерительной) обмотки также увеличивается на величину этого падения напряжения. Определим величину дополнительной погрешности, исходя из схемы замещения трехобмоточного ТН, представленной на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Схема замещения трехобмоточного ТН

В схеме замещения: Z_1 – полное сопротивление первичной обмотки, Ом; $Z'_{21} = n^2 Z_{21}$ – полное приведенное сопротивление основной вторичной обмотки, Ом; $Z'_{22} = n^2 Z_{22}$ – полное приведенное сопротивление дополнительной вторичной обмотки, Ом; Z_0 – полное сопротивление цепи намагничивания, Ом; \dot{I}_0 – ток намагничивания, A; \dot{I}_1 , \dot{I}'_{21} , \dot{I}'_{22} – токи в обмотках, A; n – коэффициент трансформации.

Используя уравнение (2.35), величину дополнительной погрешности основной обмотки от нагрузки дополнительной обмотки можно определить как:

$$\Delta f_{U} = \Delta U_{H(2)} - \Delta U_{H} = \left[\frac{U_{21(2)}' - U_{1}}{U_{1}} - \frac{U_{21}' - U_{1}}{U_{1}}\right] 100\% = \frac{U_{21(2)}' - U_{21}'}{U_{1}} 100\%, \qquad (2.73)$$

где ΔU_{μ} – погрешность основной вторичной обмотки при работе дополнительной вторичной обмотки на холостом ходу; $\Delta U_{\mu(2)}$ – погрешность основной вторичной обмотки при работе дополнительной обмотки под нагрузкой; U'_{21} – приведенное напряжение на зажимах основной вторичной обмотки, при работе дополнительной вторичной обмотки, при работе дополнительной вторичной обмотки на холостом ходу, В; $U'_{21(2)}$ - приведенное напряжение на зажимах основной вторичной обмотки при работе дополнительной на зажимах основной вторичной обмотки при работе дополнительной напряжение на зажимах основной вторичной обмотки при работе дополнительной напряжение на зажимах основной вторичной обмотки при работе дополнительной обмотки под нагрузкой, В.

Исходя из второго закона Кирхгофа можно записать:

$$U_{21(2)}' = U_1 - I_{1(2)} Z_1 - I_{21}' Z_{21}, \qquad (2.74)$$

$$U'_{21} = U_1 - I_1 Z_1 - I'_{21} Z_{21}.$$
(2.75)

При этом ток протекающий по первичной обмотке (дополнительная вторичная обмотка под нагрузкой):

$$I_{1(2)} = I_0 + I'_{21} + I'_{22}. (2.76)$$

В режиме, когда дополнительная обмотка не нагружена ($I_{22} = 0$):

$$I_1 = I_0 + I'_{21}. (2.77)$$

Подставив значения напряжений и токов из (2.74) – (2.77) в (2.73) получим:

$$\Delta f_{U} = \left[\frac{-I_{1(2)}Z_{1} - I_{21}'Z_{21}}{U_{1}} - \frac{-I_{1}Z_{1} - I_{21}'Z_{21}}{U_{1}}\right] 100\% = \frac{-I_{1(2)}Z_{1} + I_{1}Z_{1}}{U_{1}} 100\% = (2.78)$$
$$= \frac{-(I_{0} + I_{21}' + I_{22}')Z_{1} + (I_{0} + I_{21}')Z_{1}}{U_{1}} 100\% = -\frac{I_{22}'Z_{1}}{U_{1}} 100\%.$$

Таким образом, величина дополнительной погрешности при заданной мощности нагрузки дополнительной вторичной обмотки определяется величиной приведенного сопротивления только первичной обмотки.

При проектировании ТН в расчетах погрешностей принимают падение напряжения в первичной обмотке равным падению напряжения во вторичной обмотке [22]. Поэтому приведенное полное сопротивление первичной обмотки можно принимать как минимум в два раза меньше полного сопротивления трансформатора. В этом случае, если нагрузить дополнительную обмотку мощностью, равной мощности основной обмотки, погрешность основной обмотки увеличится не более чем на 50%, а не на 100% как принято считать. Следовательно, определение погрешности ТН исходя из суммы мощностей основной и дополнительной обмоток не корректно.

Эти выводы подтверждаются и экспериментальными данными, полученными в ходе эксперимента на кафедре электроэнергетических систем филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске [48]. В ходе лабораторного исследования были сняты нагрузочные характеристики многообмоточного трансформатора малой мощности типа ТПП 259 [49] со следующими основными параметрами: $U_1 = 185B$; $k_m = 185$; $I_{21\mu} = I_{22\mu} = 0,59A$; $P_{\mu} = 31BT$; $U_{21x} = U_{22x} = 1,0B$.

На рисунке 2.9 приведены:

• Нагрузочная характеристика обмотки №1 при работе обмотки №2 на холостом ходу.

- Нагрузочная характеристика обмотки №1 при нагрузке обмотки №2 током 0,33А или 56% от номинального.
- Зависимость напряжения холостого хода (XX) на обмотке №2 от нагрузочного тока обмотки №1.
- Зависимость напряжения на обмотке №2 при постоянной её нагрузке (56%) от нагрузочного тока обмотки №1.

Из рисунка 2.8 видно, что погрешность обмотки №1 при нагруженной обмотке №2 увеличивается на величину $\Delta f_{U1} = const$. Величина этой погрешности равна величине Δf_{U2} (погрешность XX на обмотке №2 при токе нагрузки обмотки №1 $I_{H1*} = 0,56$), которая соответствует потерям в первичной обмотке от тока во вторичной обмотке №1, что согласуется с выражением (2.78).



Рисунок 2.9 – Нагрузочная характеристика трансформатора типа ТПП259

Таким образом, при определении погрешностей ТН на существующих подстанциях, в случаях, если она выходит за допустимые пределы исходя из суммарной нагрузки обмоток, фактическую погрешность следует уточнять, определяя дополнительную погрешность по величине сопротивления первичной обмотки. При этом упрощенно можно принимать сопротивление первичной обмотки равным половине полного сопротивления TH, которое может быть определено из опыта короткого замыкания [25].

Выводы по главе:

1. Проведены теоретические исследования возникновения погрешностей ТН в режиме холостого хода и при нагрузке. Получены простые зависимости для их практического расчета.

2. Показано, что погрешности ТН в режиме холостого хода зависят от конструкции и материала магнитопровода. Относительная погрешность ТН с магнитопроводом С-образной формы не зависит от величины подведенного напряжения и может быть скомпенсирована витковой коррекцией.

3. Показано, что нагрузочные погрешности ТН носят линейный характер и могут определяться через напряжение короткого замыкания (U_{κ}) в производственных условиях.

4. Исследовано влияние на погрешности ТН характера нагрузки (емкостной, резистивный, индуктивный) и величины соѕф нагрузки.

5. Произведена оценка погрешностей основной обмотки многообмоточных ТН при нагрузке дополнительных обмоток. Показано, что если нагрузить дополнительную обмотку мощностью, равной мощности основной обмотки, погрешность основной обмотки увеличится не более чем на 50%.

3 Исследование погрешностей трансформаторов напряжения при нелинейной нагрузке

3.1 Трансформатор напряжения как нелинейный элемент

Рассмотрим ТН как источник высших гармоник в режиме холостого хода (при отсутствии нагрузки). ТН можно считать нелинейным элементом, так как его стальной магнитопровод обладает нелинейной характеристикой намагничивания [50]:

$$\Phi = f(i_0 w_1), \tag{3.1}$$

где Φ – магнитный поток; i_0 – намагничивающий ток; w_1 – число витков в первичной обмотке. Для примера, на рисунке 3.1 *а* показана характеристика намагничивания однофазного трансформатора с учетом гистерезиса.



Рисунок 3.1 – Характеристика намагничивания трансформатора (а); построение формы намагничивающего тока (б)

Под действием синусоидального первичного напряжения u_1 по первичной обмотке начинает протекать ток намагничивания i_0 , под действием которого

возбуждается магнитный поток, отстающий от напряжения, как и ток, на угол $\pi/2$ (см. рисунок 3.1 б). При этом ток намагничивания имеет несинусоидальный характер, как видно из рисунка 3.1 б, где штриховыми линиями показан принцип построения кривой тока для трех точек – на восходящей ветви характеристики намагничивания (точки 1–6), на нисходящей ветви (точки 1' – 6') и для максимального значения (точки 1'' – 6''). По полученной форме кривой тока намагничивания i_0 можно судить о наличии в её составе 3-й гармоники. При этом, вследствие явления гистерезиса, кривая несимметрична относительно вертикальной оси.

Вместе с тем, как видно из рисунка 3.1 δ , несинусоидальный намагничивающий ток i_0 создает синусоидальный магнитный поток Φ , который индуцирует синусоидальные первичную ЭДС e_1 и вторичную ЭДС e_2 согласно закону электромагнитной индукции [44]:

$$e_1 = 4,44 f w_1 S B_m
 e_2 = 4,44 f w_2 S B_m,
 (3.2)$$

где w_1, w_2 – число витков первичной и вторичной обмоток TH; $SB_m = \Phi$ – магнитный поток; S – площадь сечения магнитопровода; B_m – индукция в магнитопроводе; f – частота сигнала напряжения.

Рассмотрим подробнее выражение (3.2) для первичной ЭДС e_1 . Принимая неизменном значении e_1 , и учитывая, что число витков w_1 и сечение магнитопровода трансформатора *S* постоянны, можно говорить о том, что с увеличением частоты *f*, величина индукции в магнитопроводе B_m будет уменьшаться, то есть для гармонических составляющих сердечник всегда будет не насыщен. А это значит, что для высших гармоник трансформатор выступает как элемент с линейной характеристикой, и при трансформации гармонические составляющие напряжения не искажаются (это справедливо в диапазоне частот до 3 кГц).

При синусоидальной форме ЭДС гармонический состав токов намагничивания будет определяться конструкцией ТН.

В промышленных сетях ограничиваются рассмотрением гармоник не выше 13-й, для которой частота $f_{(13)}$ равна 650 Гц [50]. На таких частотах емкостями между обмотками ТН можно пренебречь.

В конструкциях современных ТН применяются магнитопроводы с узкой петлей гистерезиса, поэтому потери в стали на гистерезис невелики и ими можно пренебречь. В этом случае, кривая намагничивающего тока будет симметрична относительно горизонтальной оси и относительно начала координат (см. рисунок 3.2) и, следовательно, будет содержать только нечетные гармоники с начальными фазами, равными нулю (или сдвинутыми на π) [50]. Преобладающей в спектре гармоник является 3-я. На рисунке 3.2 показана симметричная кривая несинусоидального намагничивающего тока i_0 однофазного трансформатора, состоящая из двух гармоник $i_{0(1)}$ и $i_{0(3)} - 1$ -й и 3-й соответственно. Так как создаваемый током магнитный поток синусоидален, первичная e_1 и вторичная e_2 ЭДС так же имеют синусоидальную форму и на рисунке 3.2 они показаны одной синусоидой e.



Рисунок 3.2 – График несинусоидального намагничивающего тока *i*₀ однофазного трансформатора

В *трехфазных трансформаторах* процессы протекают иначе. Конструктивно, трехфазные ТН могут выполняться в виде группы из двух или трех однофазных трансформаторов с независимыми магнитными системами или в виде одного трехфазного трансформатора с трёхстержневым магнитопроводом, общим для всех обмоток.

Рассмотрим *трехфазный ТН из группы трех однофазных ТН*, первичная обмотка которого соединена в звезду без нулевого провода (см. рисунок 3.3 *a*). В этом случае в намагничивающем токе будет отсутствовать 3-я гармоника. Это объясняется следующим образом. Так как составляющие 3-й гармоники всех фаз совпадают по фазе, они не обнуляются при сложении в нулевой точке, а складываться в ток величиной $3 \cdot i_{0(3)}$ и, при наличии нулевого провода, замыкаются через нулевую точку силового трансформатора или генератора. Но в данной схеме нулевой провод отсутствует, а значит токи 3-й гармоники протекать не будут, а на нулевой точке ТН появится потенциал (смещение нейтрали).



Рисунок 3.3 – График несинусоидального намагничивающего тока *i*₀ группы из трех однофазных трансформаторов

Из-за отсутствия 3-й гармоники в спектре намагничивающего тока TH, форма магнитного потока в магнитопроводе становится несинусоидальной. Форму потока Φ при отсутствии 3-й гармоники тока можно получить, если из синусоиды потока 1-й гармоники вычесть синусоиду потока от 3-й гармоники тока (поток совпадает по фазе с создающим его током). Это эквивалентно складыванию синусоиды потока $\Phi_{(1)}$ и синусоиды 3-й гармоники тока, взятой в противофазе (рисунок 3.3 δ). Таким образом, кривая магнитного потока Φ складывается из двух гармоник (1-й и 3-й). Третья гармоника потока $\Phi_{(3)}$ так же, как и 1-я гармоника $\Phi_{(1)}$, замыкается по сердечнику (по цепи с малым магнитным сопротивлением) в каждом из трех TH группы, поэтому ее амплитуда велика и достигает 15 – 20 % амплитуды $\Phi_{(1)}$.

Гармонические составляющие магнитного потока Φ индуцируют в обмотках гармоники ЭДС $e_{(1)}$ и $e_{(3)}$ отстающие на угол $\pi/2$ от потоков $\Phi_{(1)}$ и $\Phi_{(3)}$ соответственно (рисунок 3.4). Как видно из рисунка, амплитуда результирующей ЭДС e, получаемой сложением графиков $e_{(1)}$ и $e_{(3)}$, значительно превышает амплитуду первой гармоники $e_{(1)}$. Такое повышение фазного напряжения может привести к повреждению изоляции ТН, поэтому соединение обмоток по схеме звезда-звезда без нулевого провода в трансформаторных группах обычно не применяется.



Рисунок 3.4 – График несинусоидального намагничивающего тока *i*₀ группы из трех однофазных трансформаторов

Нужно так же отметить, что несмотря на искажение формы фазного напряжения, линейное напряжение будет оставаться синусоидальным, так как по данным [50] в линейном напряжении 3-я гармоника отсутствует.

Рассмотрим *трехфазный трансформатор* с трехстержневым магнитопроводом и со схемой соединения обмоток звезда-звезда без нулевого провода. Потоки 3-й гармоники всех фаз, так же как и токи 3-й гармоники, равны по амплитуде и совпадают по фазе, а значит будут иметь одинаковые направления в стержнях трансформатора. Так как в магнитопроводе отсутствуют стержни, являющиеся общими для всех фаз, потоки вынуждены замыкаться по маслу, воздуху и корпусу трансформатора (как и потоки рассеяния). В следствие большого магнитного сопротивления на этом пути, 3-я гармоника потока в таких ТН невелика и форма результирующей ЭДС близка к синусоиде. Аналогичная ситуация и у TH имеющих заземление нулевой точки в сетях с изолированной нейтралью (НАМИ-6, 10, 35 кВ).

Если нейтраль силового трансформатора (или генератора) и TH соединяются через землю, то токи 3-й и кратной ей гармоник замыкаются через обмотки силового трансформатора (или генератора). В этом случае поток в магнитопроводе и индуцируемые им напряжения становятся синусоидальными.

Рассмотрим случаи с соединением одной из обмоток ТН в треугольник. При соединении первичной обмотки в треугольник, составляющие 3-й гармоники намагничивающего тока будут замыкаться в контуре треугольника, а значит рассмотренных выше искажений фазного напряжения не будет. Это справедливо как для трехфазных групп, так и для трехстержневых трансформаторов.

При соединении вторичных обмоток в треугольник, в контуре вторичной обмотки будет циркулировать 3-я гармоника тока, создаваемого 3-й гармоникой ЭДС вторичной обмотки $e_{2(3)}$, пропорциональной ЭДС первичной обмотки $e_{1(3)}$. Так как ЭДС $e_{2(3)}$ отстает от потока $\Phi_{(3)}$ на угол $\pi/2$, а ток $i_{2(3)}$ отстает от ЭДС $e_{2(3)}$ так же почти на $\pi/2$ (так как индуктивность обмоток значительная), то ток $i_{2(3)}$ оказывается в противофазе с потоком $\Phi_{(3)}$ и создаваемый им поток уравновешивает $\Phi_{(3)}$. В итоге

формы результирующего потока и фазной ЭДС практически не отличаются от синусоиды.

Произведенный анализ позволяет сделать следующие выводы [51].

1. Намагничивающий ток однофазного трансформатора при синуоидальном первичном напряжении несинусоидален и содержит ярко выраженную 3-ю гармонику. При этом вторичная ЭДС имеет синусоидальную форму.

2. Для трехфазного трансформатора с соединением обмоток по схеме звезда-звезда с нулевым проводом намагничивающий ток так же несинусоидален и содержит преобладающую 3-ю гармонику. Фазные первичные и вторичные напряжения остаются синусоидальными.

3. При соединении обмоток по схеме звезда-звезда без нулевого провода в намагничивающем токе отсутствует 3-я и кратные ей гармоники. В группе однофазных трансформаторов это приводит к искажению формы создаваемого магнитного потока и фазных напряжений с преобладанием 3-й гармоники. В трехстержневом трансформаторе фазные напряжения сохраняют практически синусоидальную форму (могут содержаться 5-я, 7-я гармоники).

4. При соединении как первичной, так и вторичной обмоток в треугольник, первичные и вторичные фазные напряжения практически синусоидальны (могут содержаться 5-я, 7-я гармоники).

5. Независимо от схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора линейное напряжение не содержит 3-й гармоники и ей кратных и практически синусоидально.

6. При использовании трехфазных ТН для подключения приборов оценки качества электроэнергии необходимо учитывать выше отмеченные особенности искажения формы синусоидального напряжения и выбирать конструкции и схемы соединения обмоток с минимальным искажением формы исследуемого напряжения.

3.2 Нагрузка вторичных цепей ТН как источник высших гармоник

Современная измерительная аппаратура, которая является основной нагрузкой для ТН, выполняется на полупроводниковой базе, из-за чего она формирует нелинейный характер нагрузок ТН. Это приводит к появлению во вторичной цепи ТН токов высших гармоник значительного уровня.

Рассмотрим состав гармоник ТН в режиме работы под нагрузкой, причем как в случае линейного характера нагрузки, так и в случае нелинейной нагрузки, так как характером нагрузки определяется гармонический состав искажений.

Линейными называются цепи, содержащие только линейные элементы, т.е. такие, сопротивление которых не зависит от тока или приложенного к ним напряжения. Если к линейной цепи приложено несинусоидальное напряжение, содержащее гармоники 1, 2, 3 ... *п*-го порядков, то ток будет содержать гармоники только этих порядков [52].

При активном сопротивлении нагрузки ТН токи всех гармоник находятся в фазе «со своими» гармониками напряжения и форма несинусоидального тока, проходящего по сопротивлению, соответствует форме приложенного несинусоидального напряжения.

Если в цепи имеется реактивное сопротивление индуктивного ωL или емкостного $1/\omega C$ характера, то фазовые сдвиги токов всех гармоник будут различны и форма несинусоидального тока будет отличаться от формы приложенного несинусоидального напряжения. Так как реактивное сопротивление зависит от частоты тока, а индуктивное сопротивление прямо пропорционально порядку гармоники, то амплитуда гармоник тока будет уменьшаться обратно пропорционально порядку гармоники, то амплитуда гармоник тока будет и той же амплитуде напряжения гармоник. (см. рисунок 3.5 δ).

Емкостное линейное сопротивление обратно пропорционально порядку гармоники, поэтому чем выше порядок гармоники, тем меньшее сопротивление току будет иметь один и тот же конденсатор. То есть амплитуды гармоник тока будут увеличиваться пропорционально порядку гармоники (см. рисунок 3.5 *в*).

67



Рисунок 3.5 – Изменение формы несинусоидального тока в зависимости от реактивного сопротивления цепи

Важно отметить, что в линейных цепях дополнительных гармоник не возникает и, следовательно, при синусоидальном напряжении ток в цепи всегда будет синусоидальным.

Нелинейными называются цепи, сопротивление которых зависит от протекающего по ним тока или приложенного к ним напряжения. Их вольтамперная характеристика (BAX) нелинейна [52]. Нелинейные элементы могут иметь симметричные BAX или несимметричные. Примеры BAX нелинейных элементов приведены на рисунках 3.6 и 3.7.

Нелинейные элементы являются преобразователями синусоидального напряжения (или тока) в периодическое несинусоидальное напряжение (или ток), причем часто нежелательное. Образование несинусоидального тока показано на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Симметричная ВАХ нелинейного элемента

Если к нелинейному элементу с симметричной характеристикой приложить синусоидальное напряжение *u* (см. рисунок 3.6), то путем несложного построения можно убедиться, что форма тока *i*, протекающего по этому элементу, будет остроконечной и резко отличаться от синусоиды. Примером такого элемента является ТН при XX, рассмотренный выше.

Несинусоидальную кривую напряжения (тока) можно разложить по теореме Фурье на составляющие гармоники и представить следующим тригонометрическим рядом [50]:

$$a = f(\omega t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_{k1}) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_{k2}) + A_3 \sin(3\omega t + \varphi_{k3}) + \dots$$
(3.3)

где a – мгновенное значение любой несинусоидальной кривой сложной формы; A_0 – постоянная составляющая; A_1 , A_2 , A_3 – максимальные значения первой, второй, третьей и т.д. гармоник; φ_{k1} , φ_{k2} , φ_{k3} – начальные фазы гармоник.

В [50] показано, что нелинейные элементы с симметричной ВАХ (если несинусоидальные кривые симметричны относительно оси времени), не содержат в кривой тока постоянную составляющую A_0 и четные гармоники (k = 2, 4, 8...). При разложении в ряд кривой тока для элемента с несимметричной ВАХ (см. рисунок 3.7, где показана характеристика вентильного элемента), он будет иметь постоянную составляющую.



Рисунок 3.7 – Несимметричная ВАХ нелинейного элемента

В преобразователях переменного тока в постоянный используются, как правило, диодные выпрямители. К таким преобразователям, включаемым во вторичные цепи ТН, относятся блоки питания электронных счетчиков, выпрямительные блоки устройств релейной защиты и т.д.

Если вторичная обмотка ТН соединена в звезду и питает даже равномерную по фазам нагрузку, соединенную в звезду, и нулевые точки их соединены нулевым

проводом (рисунок 3.8), то в нулевом проводе и в каждом линейном проводе будут протекать токи 3-й гармоники и ей кратных. Ток в нулевом проводе определяется ЭДС 3-й гармоники и сопротивлением нулевого провода $Z_{0(3)}$ для 3-й гармоники, а также сопротивлением нагрузки для третьей гармоники $Z_{n(3)}$:

$$\dot{I}_{0(3)} = \frac{E_{(3)}}{\dot{Z}_{0(3)} + \frac{Z_{\mu(3)}}{3}}.$$
(3.4)

Ток 3-й гармоники в каждом линейном проводе:

$$\dot{I}_{_{H(3)}} = \frac{I_{_{0(3)}}}{3}.$$
(3.5)



Рисунок 3.8 – Соединение вторичной обмотки трансформатора *T* и нагрузки *H* в звезду с нулевым проводом *N*

В трехфазных ТН с двумя однофазными трансформаторами, соединенными по схеме неполного треугольника (рисунок 3.9) в шинах вторичного напряжения 3я гармоника и кратные ей, отсутствуют.



Рисунок 3.9 – Соединение двух однофазных трансформаторов по схеме неполного треугольника

Если измеряемое напряжение несинусоидальное, то фазные соотношения векторов высших гармоник трехфазного трансформатора можно представить следующими соотношениями:

$$\begin{cases} e_A(k) = E_{m(k)} \sin k\omega t \\ e_B(k) = E_{m(k)} \sin k(\omega t - 120^\circ) \\ e_B(k) = E_{m(k)} \sin k(\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$
(3.6)

Если принять k = 1; 7; 13, то фазы A данных гармоник опережают фазы B на угол 120° и вращение этих векторов происходит в прямой последовательности (A - B - C), т.е. имеет место прямая последовательность векторов гармоник 1; 7; 13.

Если k = 5; 11, то фазы A этих гармоник опережает на угол 120° фазы C. Следовательно, вращение векторов этих гармоник происходит в обратной последовательности (A - C - B), т.е. при прямой последовательности 1-й гармоники 5-я и 11-я гармоники имеют обратную последовательность.

Как уже отмечалось ранее, ЭДС 3-й гармоники всех фаз совпадают между собой по фазе (взаимно не вращаются), т.е. имеют нулевую последовательность.

Сказанное иллюстрирует таблица 3.1, где показано последовательное преобразование аргумента каждой фазы для 1, 2, 3, 5, 7, 11, 13-й гармоник. Для любой гармоники по этой методике можно определить последовательность вращения ее вектора.
Таблица 3.1 – Фазовые соотношения гармоник в трехфазной обмотке трансформатора

№ гармоники	Вектор фазы А	Вектор фазы В	Вектор фазы С	Посл-ть вращения векторов
1	$E_{m(1)}\sin\omega t$	$E_{m(1)}\sin(\omega t - 120^\circ)$	$E_{m(1)}\sin(\omega t-240^\circ)$	Прямая
2	$E_{m(2)}\sin 2\omega t$	$E_{m(2)} \sin 2(\omega t - 120^\circ) =$ = $E_{m(2)} \sin(2\omega t - 240^\circ)$	$E_{m(2)}\sin 2(\omega t - 240^\circ) = E_{m(2)}\sin(2\omega t - 480^\circ) =$ $= E_{m(2)}\sin(2\omega t - 120^\circ)$	Обратная
3	$E_{m(3)}\sin 3\omega t$	$E_{m(3)}\sin 3(\omega t - 120^\circ) = E_{m(3)}\sin(3\omega t - 360^\circ) =$ $= E_{m(3)}\sin(3\omega t)$	$E_{m(3)}\sin 3(\omega t - 240^\circ) = E_{m(3)}\sin(3\omega t - 720^\circ) =$ $= E_{m(3)}\sin(3\omega t)$	Нулевая
5	$E_{m(5)}\sin 5\omega t$	$E_{m(5)}\sin 5(\omega t - 120^\circ) = E_{m(5)}\sin(5\omega t - 600^\circ) =$ $= E_{m(5)}\sin(5\omega t - 240^\circ)$	$E_{m(5)}\sin 5(\omega t - 240^\circ) = E_{m(5)}\sin(5\omega t - 1200^\circ) =$ $= E_{m(5)}\sin(5\omega t - 120^\circ)$	Обратная
7	$E_{m(7)}\sin7\omega t$	$E_{m(7)}\sin 7(\omega t - 120^{\circ}) = E_{m(7)}\sin(7\omega t - 840^{\circ}) = E_{m(7)}\sin(7\omega t - 120^{\circ})$	$E_{m(7)}\sin 7(\omega t - 240^\circ) = E_{m(7)}\sin(7\omega t - 1680^\circ) =$ $= E_{m(7)}\sin(7\omega t - 240^\circ)$	Прямая
11	$E_{m(11)}\sin 1l\omega t$	$E_{m(11)} \sin 11(\omega t - 120^\circ) = E_{m(11)} \sin(11\omega t - 1320^\circ) = E_{m(11)} \sin(11\omega t - 240^\circ)$	$E_{m(11)} \sin 11(\omega t - 240^\circ) = E_{m(11)} \sin(11\omega t - 2640^\circ) = E_{m(11)} \sin(11\omega t - 120^\circ)$	Обратная
13	$E_{m(13)}\sin 13\omega t$	$E_{m(13)} \sin 13(\omega t - 120^\circ) = E_{m(13)} \sin(13\omega t - 1560^\circ) = E_{m(13)} \sin(13\omega t - 120^\circ)$	$E_{m(13)}\sin 13(\omega t - 240^{\circ}) = E_{m(13)}\sin(13\omega t - 3120^{\circ}) = E_{m(13)}\sin(13\omega t - 240^{\circ})$	Прямая

3.3 Оценка добавочных потерь от высших гармоник в трансформаторах напряжения и их вторичных цепях

При переменном токе повышенной частоты в проводах и обмотках выделяется значительно большая мощность, чем при постоянном токе. Разность между мощностью потерь на переменном и постоянном токе называют добавочными потерями. Учитывают их с помощью коэффициента добавочных потерь K_{o} , равного отношению мощности потерь при переменном токе к мощности потерь при постоянном токе [53]:

$$K_{\partial} = \frac{P_{z}}{P_{z}} = \frac{I^{2}R_{z}}{I^{2}R_{z}} = \frac{R_{z}}{R_{z}},$$
(3.6)

При этом, действующее значение переменного тока и значение постоянного тока в проводе считаются одинаковыми.

В проводнике переменный ток вследствие поверхностного эффекта вытесняется в периферийные области сечения провода. В результате сечение, по которому протекает ток (эффективное сечение), уменьшается, сопротивление провода и потери мощности и напряжения в нем возрастают.

Оценка этих дополнительных потерь приобретает актуальность в связи с нелинейностью нагрузок вторичной цепи TH, из-за которой ток нагрузки содержит высшие гармоники довольно значительного уровня. Так по данным исследования качества электроэнергии вторичной цепи TH одной из подстанций ОАО «МРСК Центра» - «Смоленскэнерго» установлен следующий состав высших гармоник тока (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Гармонический состав тока вторичных цепей ТН на секции 6 кВ ПС

I ₍₁₎ ,	K _{I (2)} ,	K _{I (3)} ,	K _{I (4)} ,	K _{I (5)} ,	K _{I (6)} ,	K _{I (7)} ,	K _{I (8)} ,	K _{I (9)} ,	K _{I (10)} ,	K _{I (11)} ,	K _{I (12)} ,	K _{I (13)} ,
А	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0,24	0,31	31,89	0,33	51,37	0,17	36,7	0,5	5,72	0,2	14,73	0,09	10,8

В практических расчетах используют понятие эквивалентной глубины проникновения электромагнитной волны (глубины проникновения). Глубина

проникновения равна такой толщине проводящей пластины или провода, на которой плотность тока считается неизменной, причем полный ток в проводе (пластине) так же считается одинаковым.

Эквивалентная глубина проникновения в пластину определяется по следующему уравнению [53]:

$$\lambda = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\gamma}},\tag{3.7}$$

где $\omega = 2\pi f$; f – частота электромагнитной волны, Гц; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ Гн/см – магнитная постоянная; γ – удельная проводимость меди, $\gamma = 5.5 \cdot 10^5$ 1/Ом·см.

При подстановке численных значений, выражение для глубины проникновения электромагнитной волны в функции ее частоты принимает вид:

$$\lambda = \sqrt{\frac{46,1}{f}}, \,\mathrm{CM}.\tag{3.8}$$

Сопротивление уединенного сплющенного провода круглого сечения зависит от соотношения между наружным радиусом провода r_0 и глубиной проникновения электромагнитного поля. При сравнительно низких частотах ($r_0 < \lambda$) сопротивление единицы длины провода [53]:

$$R_{\approx} = R_{=} \left[1 + \frac{1}{48} \left(\frac{r_0}{\lambda} \right)^4 \right], \tag{3.9}$$

где $R_{=} = \frac{1}{\pi r_{0}^{2} \gamma}$ - сопротивление единицы длины провода при постоянном токе.

Для высоких частот ($r_0 > \lambda$) [53]:

$$R_{\approx} = R_{=} \left[\frac{1}{4} + \frac{r_0}{2\lambda} + \frac{3}{32} \cdot \frac{\lambda}{r_0} \right]. \tag{3.10}$$

Соответственно коэффициент добавочных потерь для уединенных проводов круглого сечения:

при ($r_0 < \lambda$):

$$K_{\partial} = 1 + \frac{1}{48} \left(\frac{r_0}{\lambda}\right)^4; \qquad (3.11)$$

при ($r_0 > \lambda$):

$$K_{o} = \frac{1}{4} + \frac{r_{0}}{2\lambda} + \frac{3}{32} \cdot \frac{\lambda}{r_{0}} \,. \tag{3.12}$$

В обмотках ТН (катушки с магнитопроводом) добавочные потери вызваны собственным поверхностным эффектом в проводнике; влиянием соседних проводников обмотки (эффектом близости). Магнитное поле обмотки имеет две составляющие: аксиальную H_y и радиальную H_x . Вытеснение тока в проводнике происходит в двух направлениях: от осевой составляющей поля – в радиальном направлении (вдоль оси x); от радиальной составляющей – в направлении оси y, причем радиальная составляющая значительно меньше аксиальной. Поэтому в практических расчетах считается, что линии магнитного поля в обмотке, намотанной на магнитопроводе, имеют одно направление – вдоль оси y и вытеснение тока происходит в радиальном направлении (см. рисунок 3.10).

В практических расчетах считается, что линии магнитного поля в обмотке, намотанной на магнитопровод, имеют направление – вдоль оси у и вытеснение тока происходит в радиальном направлении.

Для катушки ТН с магнитопроводом коэффициент добавочных потерь зависит от глубины проникновения радиальной составляющей электромагнитного поля *x* и определяется:

при $0 \le x \le 1$, что часто имеет место на практике [53]:

$$K_{\partial} = 1 + \left(\frac{m^2}{15}\right) x^4;$$
 (3.13)

где $x = d_0 \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \gamma}{2}}$; d_0 – диаметр изолированного провода, см; m – число слоев обмотки (число проводников обмотки в радиальном направлении). Или если подставить численные значения для μ_0 и γ из (3.7):

$$x = \frac{d_0}{6,79}\sqrt{f} = 0.147d_0\sqrt{f} . (3.14)$$



Рисунок 3.10 – Магнитное поле рассеяния двухобмоточного трансформатора. 1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка

При использовании провода прямоугольного сечения [53]:

$$K_{\partial} = 1 + \left(\frac{m^2}{9}\right) x^4;$$
 (3.15)

где $x = 0,147a\sqrt{f}$; *а* — ширина проводника в радиальном направлении, см.

Проанализируем зависимость K_{∂} от частоты для различных значений d_0 , *а* и *m*. Для проводников круглого сечения, при подстановке в (3.13) численных значений для μ_0 и γ , выражение приводится к следующему виду:

$$K_{a} = 1 + 3143 \cdot m^{2} f^{2} d_{0}^{4}, \qquad (3.16)$$

где значения d_0 в *м*, а *f* в *Гų*. Для проводников прямоугольного сечения, при подстановке в (3.15) численных значений для μ_0 и γ , выражение приводится к виду:

$$K_{\partial} = 1 + 5238 \cdot m^2 f^2 a^4, \qquad (3.17)$$

где значения *а* в *м*, а *f* в *Гų*.

Основным материалом для изготовления обмоток трансформаторов напряжения является изолированный медный обмоточный провод круглого или прямоугольного сечения. Вследствие малых токов для трансформаторов напряжения применяется, главным образом, круглый обмоточный провод диаметром $d_1 = 0,2$ мм (обмотка высокого напряжения) и d_2 до 2 – 4 мм (обмотка низкого напряжения) [22].

Построим зависимости $K_d = f(f)$ для проводников круглого сечения по выражению (3.16) при значениях $d_1 = 0,2$ мм и $d_2 = 2$ мм для диапазона от 1-й до 40й гармоники, что соответствует частотам 50 – 2000 Гц. Такой диапазон частот принят так как согласно ГОСТ 32144-2013 [8] при оценке качества электроэнергии учитываются значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка. Для первичной обмотки, задаемся числом слоев m = 5, 10 и 20; для вторичной обмотки m = 1, 2 (см. рисунки 3.11).



Рисунок 3.11 – Зависимость коэффициента добавочных потерь K_{∂} от частоты f для проводов круглого сечения диаметром 0,2 мм (а) и 2,0 мм (б)

Из полученных зависимостей видно, что для проводов диаметром $d_1 = 0,2$ мм коэффициент добавочных потерь на частоте 2000 Гц не превышает значения 1,01

при числе слоев до 20-ти (см. рисунок 3.11), а при числе слоев до 10-ти его значения не превышают 1,002. Отсюда можно сделать вывод, что при расчете потерь и погрешностей в первичной обмотке ТН можно не учитывать увеличение активного сопротивления токами высших гармоник в рассматриваемом диапазоне частот.

Для проводов диаметром $d_2 = 2$ мм в однослойной обмотке K_{∂} достигает величины 1,2 на частоте 2000 Гц (см. рисунок 3.11 б). В двухслойной обмотке K_{∂} значительно увеличивается и достигает величины 1,8. Таким образом, для круглых проводов вторичной обмотки ТН (особенно многослойных) нельзя пренебрегать коэффициентом добавочных потерь.

Построим аналогичную зависимость $K_{\partial} = f(f)$ по выражению (3.17) для проводника прямоугольного сечения, эквивалентного сечению круглого проводника диаметром 2 мм. Такому условию удовлетворяет проводник сечением 0,9 х 3,75 мм. Сечения и размеры прямоугольного обмоточного провода (толщина *a* и ширина *b*) приводятся в ГОСТ 26615-85 [54], причем активные сечения проводов, приводимые в таблице, немного меньше произведения *a* х *b*. Это уменьшение вызвано небольшими закруглениями углов сечения, необходимыми для избегания порчи витковой изоляции на этих углах.



Рисунок 3.12 – Зависимость коэффициента добавочных потерь K_{∂} от частоты f для проводов прямоугольного сечения, a = 0.9 мм

Из полученного графика видно, что для проводов прямоугольного сечения K_{∂} не превышает 1,015 в однослойной обмотке и 1,055 в двухслойной (см. рисунок 3.12). Это значительно меньше, чем для круглых проводников эквивалентного сечения.

Таким образом, для выполнения вторичных обмоток наиболее оптимальным является применение проводников прямоугольного сечения, имеющих бо́льшую ширину в аксиальном направлении и меньшую в радиальном. Добавочные потери мощности и напряжения от токов высокой частоты в таких обмотках будут незначительны. Результаты данного исследования подтверждены и проведенными на кафедре ЭЭС филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске экспериментальными исследованиями [55], согласно которым у круглого медного проводника диаметром d = 0,6 мм и длиной L = 0,3 м активное сопротивление оставалось неизменным при возрастании частоты до 2 кГц.

3.4 Оценка погрешностей трансформаторов напряжения при несинусоидальной нагрузке

Согласно проведенному анализу [56], нагрузка измерительных (TH) трансформаторов напряжения формируется так называемыми общестанционными нагрузками и нагрузками от цепей учета электроэнергии. Значительную часть этой нагрузки составляют блоки питания, реле фильтров нулевой последовательности, электронные счетчики и др. элементы, содержащие выпрямительные которые являются нелинейными элементы, элементами, обуславливающими несинусоидальность токов нагрузки.

Наличие высших гармоник тока во вторичных цепях ТН подтверждают в качестве примера замеры формы тока и напряжения, проведенные на вводе цепей напряжения электронных счетчиков типа Меркурий 230 и на вводе вторичной цепи ТН разных типов, установленных на подстанциях ОАО «МРСК Центра» – «Смоленскэнерго» (см. рисунок 3.13). Результаты измерений на одной из ПС

110/35/6кВ и на вводе цепей напряжения счетчика Меркурий 230 AR-03 представлены на рисунке 3.14 и в таблице 3.3. Результаты измерений на остальных подстанциях приведены в приложении 1. Измерения производились с использованием измерительного комплекса на основе прибора Энергомонитор - 3.3T1 производства НПП Марс-Энерго [57].



Рисунок 3.13 – В процессе снятия нагрузочного тока ТН на 1 секции шин ПС Смоленск-2

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Счетчик типа Меркурий 230AR-03												
$K_{i(k)}$, %	100	0,02	2,38	0,21	2,88	0,83	3,78	2,84	16,39	12,05	8,83	0,88	3,03
$\varphi_{2(k)}, {}^{0}$	-86,52	0	0	0	0	0	0	0	-79,59	-77,98	-78,45	0	0
	Ввод вторичной цепи ТН на ПС 110/35/6кВ												
$K_{i(k)}$, %	100	0,31	31,89	0,33	51,37	0,17	36,7	0,5	5,72	0,2	14,73	0,09	10,8
$\varphi_{2(k)}, {}^{o}$	-24,32	0	119,48	-90,18	-111,57	0	-9,88	172,12	-38,09	0	-119,47	0	-146,91

Таблица 3.3 – Спектр гармоник тока цепи напряжения счетчика и на вводе вторичной цепи ТН

где k – номер гармоники, $\varphi_{2(k)}$ – фаза k-й гармоники.



Рисунок 3.14 – Форма тока и напряжения на вводе счетчика типа Меркурий 230AR-03 (a); форма нагрузочного тока TH на ПС 110/35/6кВ (б)

Нелинейные нагрузки являются генераторами высших гармоник, т.е. получая энергию от TH они потребляют энергию первой гармоники частично преобразуют ее в энергию высших гармоник, которая возвращается обратно в TH. Энергия высших гармоник, генерируемая нелинейными нагрузками, рассеивается в соединительных проводах, обмотках TH и в других линейных нагрузках. При этом действующее значение мощности нагрузки TH возрастает при сохранении активной мощности основной гармоники.

Для иллюстрации этих процессов и определения действительной полной мощности в системе с несинусоидальным током проведены исследования на схеме экспериментальной цепи ТН с нелинейной нагрузкой, которая создает ток несинусоидальной формы, представленной на рисунке 3.15 *б*.



Рисунок 3.15 – Схема эксперимента (а), форма тока и напряжения (б)

Разложив представленную форму тока в ряд Фурье, получили спектр действующих значений гармоник тока: $I_{(1)} = 1,0A$; $I_{(3)} = 0,354A$; $I_{(5)} = 0,707A$. Действующее значение несинусоидального тока:

$$I_{\alpha} = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} I_{(k)}^{2}} = \sqrt{1,0^{2} + 0,354^{2} + 0,707^{2}} = 1,28A.$$
(3.18)

Учитывая, что U₁ имеет синусоидальную форму, полная мощность, потребляемая из сети, составит:

$$S = U_1 I_\alpha = 100 \cdot 1,28 = 128BA \,. \tag{3.19}$$

Полная мощность, потребляемая от источника на основной частоте:

$$S_{(1)} = U_1 I_{(1)} = 100 \cdot 1,0 = 100 BA.$$
(3.20)

Активная составляющая полной мощности первой гармоники для этой схемы при $R_{\mu} = 990$ м и активном сопротивлении обмоток TH $R_m = 1,00$ м составит:

$$P_{(1)} = I_{(1)}^2 (R_{_{H}} + R_{_{m}}) = 1,0^2 \cdot (99,0+1,0) = 100,0Bm .$$
(3.21)

Таким образом, в данной схеме мощность, потребляемая на первой гармонике, является чисто активной, а в общем случае будет определяется характером нагрузки TH (активная, активно-индуктивная, активно-емкостная).

При нелинейной нагрузке полная потребляемая мощность из сети всегда будет больше мощности на основной частоте в K_n , что подтверждается при подстановке в уравнение (3.19), записанное в общем виде, параметров рассматриваемого примера:

$$S_{\alpha} = U_{1}I_{\alpha} = U_{1}\sqrt{\sum_{k=1}^{n} I_{(k)}^{2}} = U_{1}I_{(1)}\sqrt{\sum_{k=1}^{n} K_{I(k)}^{2}} = S_{(1)}K_{n}, \qquad (3.22)$$

где *K*_{*I*(*k*)} – коэффициент *k*-й гармонической составляющей тока,

$$K_n = \sqrt{\sum_{k=1}^n K_{I(k)}^2} = \sqrt{1^2 + 0.354^2 + 0.707^2} = 1.28.$$
(3.23)

Это увеличение полной мощности обусловлено генерацией нелинейной нагрузкой высших гармоник тока, которое будет являться реактивной мощностью вторичного потока энергии, циркулирующей между источником этих гармоник и

источником питания U₁, вызывая дополнительные потери в сопротивлениях обмоток TH и проводах линий связи:

$$\Delta P = \left(I_{\alpha}^{2} + I_{(1)}^{2}\right)R_{m} = \left(1,28^{2} + 1,0^{2}\right)I, 0 = 0,64Bm.$$
(3.24)

То есть происходит увеличение нагрузки TH на величину дополнительных потерь Δ*P* при сохранении активной мощности нагрузки вторичной цепи TH.

Величина реактивной мощности вторичного потока энергии определяется следующей зависимостью:

$$Q = \sqrt{S_{\alpha}^{2} - (P_{(1)} + \Delta P)^{2}} = \sqrt{128,0^{2} - 100,6^{2}} = 79,1Bap.$$
(3.25)

Коэффициент мощности полной нагрузки ТН составит:

$$\cos\varphi_{\alpha} = \frac{P_{(k)}}{S_{\alpha}} = \frac{100,6}{128,0} = 0,79.$$
(3.26)

В условиях эксплуатации измерениями действующих нагрузок TH фиксируются следующие параметры: U_2 , S_α , I_α , $\cos \varphi_\alpha$ по которым осуществляется оценка фактического класса точности в котором работает TH. Однако фактические погрешности при нелинейной нагрузке не будут соответствовать погрешностям при той же мощности, но с линейной нагрузкой.

Произведем оценку погрешностей ТН при наличии высших гармоник через разность действующих значений измеряемого напряжения U_1 и действующего значения напряжения U_2 вторичной обмотки:

$$\Delta U_m = U_2 - U_1. \tag{3.27}$$

Для получения действующего значения напряжения U_2 воспользуемся принципом суперпозиции, для чего определим падения напряжения в сопротивлении трансформатора $\Delta \dot{U}_{m(k)}$ и напряжения $\dot{U}_{2(k)}$ для каждой гармоники в отдельности (в матричной форме), т.е.:

$$\left\|\Delta \dot{U}_{m(k)}\right\| = \begin{pmatrix} \dot{I}_{(1)} z_{m(1)} \\ \dot{I}_{(3)} z_{m(3)} \\ \dot{I}_{(5)} z_{m(5)} \end{pmatrix},$$
(3.28)

$$\left\| \dot{U}_{2(k)} \right\| = \left\| \dot{U}_{1} \right\| - \left\| \Delta \dot{U}_{m(k)} \right\|.$$
(3.29)



Рисунок 3.16 – Схема эксперимента (а), форма напряжения u₂(t) при работе TH на нелинейную нагрузку (б)

Углы сдвига гармоник напряжения $\dot{U}_{2(k)}$ по отношению к напряжению $\dot{U}_{1(k)}$ определяются как:

$$\varphi_{U2(k)} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Im}(\dot{U}_{2(k)})}{\operatorname{Re}(\dot{U}_{2(k)})}\right).$$
(3.30)

Таким образом, напряжение \dot{U}_2 будет иметь несинусоидальную форму, которую можно построить по следующему выражению:

$$u_{2}(t) = \sum_{k=1}^{n} \left| \dot{U}_{2(k)} \right| \sin\left(k\omega t + \varphi_{U2(k)}\right).$$
(3.31)

В этом случае действующее значение напряжения U₂ определяется выражением:

$$U_{2} = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} \left| \dot{U}_{2(k)} \right|^{2}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} \left| \dot{U}_{1(k)} - \Delta \dot{U}_{m(k)} \right|^{2}} .$$
(3.32)

Если выделить составляющую первой гармоники и учесть отсутствие высших гармоник в составе \dot{U}_1 , то выражение (3.32) можно представить в виде:

$$U_{2} = \sqrt{\left|\dot{U}_{1(1)} - \Delta\dot{U}_{m(1)}\right|^{2} + \sum_{k=2}^{n} \left|-\Delta\dot{U}_{m(k)}\right|^{2}} = \sqrt{\left|\dot{U}_{2(1)}\right|^{2} + \sum_{k=2}^{n} \left|-\Delta\dot{U}_{m(k)}\right|^{2}}.$$
 (3.33)

Из анализа выражения (3.33) видно, что действующее значение несинусоидального напряжения U₂ всегда больше действующего значения U₂₍₁₎ для первой гармоники:

$$U_{2(1)} = \sqrt{\left|\dot{U}_{1(1)} - \Delta \dot{U}_{m(1)}\right|^2} \,. \tag{3.34}$$

Напряжения $u_1(t)$ и $u_2(t)$ могут не совпадать по фазе (см. рисунок 3.16 б) для рассматриваемого примера), тогда этот угловой сдвиг будет представлять собой угловую погрешность ТН. Этот угловой сдвиг может быть определен решением уравнения (3.31) относительно *t*, если приравнять его правую часть к нулю:

$$\sum_{k=1}^{n} \left| \dot{U}_{2(k)} \right| \sin \left(k \omega t + \varphi_{U2(k)} \right) = 0.$$
(3.35)

Для перевода полученного значения временного сдвига *t*₀ в градусы необходимо воспользоваться выражением:

$$\Delta \theta_{_{\!H}\alpha} = \frac{t_0 \cdot 360}{T}.\tag{3.36}$$

Для проверки предложенной методики оценки погрешностей TH от нелинейной нагрузки была предложена модель рассматриваемой схемы, приведенная на рисунке 3.16 *а*. В схеме синусоидальное напряжение \dot{U}_1 подведено к нагрузке TH с активным сопротивлением $R_n = 990$ м. Сопротивление эквивалентного трансформатора учитывается в схеме комплексным сопротивлением $z_m = 1 + 1j$ Ом. Для формирования несинусоидальной формы тока параллельно сопротивлению нагрузки включены источники тока J_3 и J_5 с действующими значениями токов, соответствующими действующим значениям 3-й и 5-й гармоник тока.

Для данной схемы по приведенной выше методике были рассчитаны значения напряжений, токов и погрешностей для эквивалентного TH, которые полностью совпали с результатами измерений на компьютерной модели в программном комплексе NI Multisim (см. рисунок 3.17).

$$\left\|\Delta \dot{U}_{m}\right\| = \begin{pmatrix} \dot{I}_{(1)} z_{m(1)} \\ \dot{I}_{(3)} z_{m(3)} \\ \dot{I}_{(5)} z_{m(5)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,01+j1,0 \\ -0,354-j1,06 \\ -0,707-j3,54 \end{pmatrix}.$$
(3.37)

$$\left\| \dot{U}_{2} \right\| = \left\| \dot{U}_{1} \right\| - \left\| \Delta \dot{U}_{m} \right\| = \begin{pmatrix} 100\\0\\0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1,01+j1,0\\-0,354-j1,06\\-0,707-j3,54 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 98,99-j1,0\\0,354+j1,06\\0,707+j3,54 \end{pmatrix}.$$
 (3.38)

Матрица угловых сдвигов гармоник напряжения U₂:

$$\varphi_{U2} = \begin{pmatrix} -0.57^{\circ} \\ 71.7^{\circ} \\ 78.8^{\circ} \end{pmatrix}.$$
 (3.39)

Форма полученного напряжения показана на рисунке 3.15 б.

Действующее значение напряжения \dot{U}_2 на первой гармонике:

$$|\dot{U}_{2(1)}| = |\dot{U}_1 - \Delta \dot{U}_{m(1)}| \approx |99,0 - j1,0| = 99,0B.$$
 (3.40)

Тогда амплитудная погрешность ТН на первой гармонике:

$$\Delta U_{\mu(1)} = U_{2(1)} - U_1 = 99,0B - 100,0 = -1,0B.$$
(3.41)

Вектор напряжения U_1 принимаем за начало отсчета, поэтому начальная фаза его равна нулю ($\varphi_{U1} = 0$). Тогда вектор напряжения U_2 поворачивается по

отношению к вектору U_l на угол $\varphi_{U2(1)} = arctg\left(\frac{\text{Im}(\dot{U}_{2(1)})}{\text{Re}(\dot{U}_{2(1)})}\right) = 0,57^\circ$.

Угловая погрешность определяется выражением

$$\Delta \theta_{\mu(1)} = \varphi_{U1} - \varphi_{U2} = 0 - 0.57^{\circ} = -0.57^{\circ}. \tag{3.42}$$

Так как подводимое напряжение является синусоидальным, то при отсутствии в цепи токов высших гармоник, напряжение U₂ будет так же синусоидальным. Это позволяет при расчете погрешностей пользоваться векторными диаграммами (см. рисунок 3.17).

Так как угол сдвига между векторами напряжений U_1 и U_2 небольшой, то амплитудную погрешность трансформатора на основной частоте можно упрощенно оценить исходя из действующего значения тока и модуля сопротивления трансформатора (без необходимости вести вычисления с комплексными числами) следующим выражением (см. векторную диаграмму на рисунке 3.16):

$$\Delta U_{H(1)} = -I_{(1)} \cdot z_{m(1)} \cos(\varphi_{2(1)} - \varphi_{2(1)}) = -\Delta U_{m(1)} \cos \gamma_{(1)}.$$
(3.43)

где $\varphi_{z(1)}$ — угол сопротивления трансформатора на частоте 50Гц. $\varphi_{Z(1)} = arctg\left(\frac{\text{Im}(z_{m(1)})}{\text{Re}(z_{m(1)})}\right) = 45,0^{\circ}.$



Рисунок 3.17 – Векторная диаграмма ТН под нагрузкой

Коэффициент мощности тока первой гармоники $\cos \varphi_{2(1)} = 1$, тогда $\varphi_{2(1)} = 0^{\circ}$.

$$\Delta U_{\mu(1)} = -1,414\cos(0-45) = -1,0B$$
,

что согласуется с результатом, полученным по формуле (3.41).

Угловую погрешность трансформатора на основной частоте можно упрощённо оценить следующим выражением:

$$\Delta \theta_{\mu(1)} = 34,4I_{2(1)} \cdot z_{m(1)} \sin(\varphi_{2(1)} - \varphi_{z(1)}) = 34,4\Delta \dot{U}_{m(1)} \sin \gamma_{(1)}.$$

$$\Delta \theta_{\mu(1)} = 34,4 \cdot 1,414 \sin(0-45) = -34,4' = -0,57^{\circ},$$
(3.44)

что так же согласуется с результатом, полученным по формуле (3.42).

Действующее значение напряжения U₂ при наличии высших гармоник:

$$U_{2} = \sqrt{\left|\dot{U}_{2(1)}\right|^{2} + \sum_{k=2}^{n} \left|-\Delta \dot{U}_{m(k)}\right|^{2}} = 99,07B$$

Тогда амплитудная погрешность ТН с нелинейной нагрузкой:

$$\Delta U_{\mu\alpha} = U_2 - U_1 = 99,07 - 100,0B = -0,93B.$$

Решив уравнение (18) получим значение момента времени, когда кривая напряжения U₂ пересекает ось времени

$t_0 = 0,000109ce\kappa$.

Угловая погрешность при $t_0 = 0,000109ce\kappa$:

$$\Delta \theta_{\mu\alpha} = 1,97^{\circ}$$
.

Полученное значение угловой погрешности почти в 4 раза превышает значение, полученное по формуле (3.42) для первой гармоники ($\Delta \theta_{u(1)} = -0.57^{\circ}$). Однако, расчеты для схем с другим составом высших гармоник показали, что величина угловой погрешности в значительной мере определяется амплитудами и фазами токов высших гармоник и может принимать другие соотношения по отношению к угловой погрешности на первой гармонике.

Результаты расчетов хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования эксперимента в программном комплексе *NI Multisim* (см. рисунок 3.18).

Таким образом, при работе ТН на нелинейную нагрузку, полная потребляемая нагрузкой мощность увеличивается за счет реактивной мощности искажения, но это не приводит к увеличению амплитудной погрешности ТН, в то время, как угловая погрешность может увеличиваться. При этом ГОСТ 1983-2001 предписывает определять погрешность ТН по величине полной мощности и соѕф его нагрузки. Поэтому в методику выбора и проверки ТН необходимо внести уточнения:

- Амплитудную погрешность ТН следует определять только по мощности первой гармоники тока нагрузки. Дополнительная мощность, потребляемая токами высших гармоник, незначительно влияет на величину погрешности ТН.
- Угловая погрешность ТН при наличии высших гармоник может отличаться от угловой погрешности на первой гармонике, поэтому её следует оценивать исходя из формы напряжения U₂ по методике, представленной выше.





Оценка ТН по предлагаемой уточненной методике может позволить в некоторых случаях отказаться от установки дополнительных ТН на подстанциях при соответствии требованиям по угловой погрешности.

3.5 Оценка погрешностей измерения качества напряжения трансформаторами напряжения с нелинейной нагрузкой вторичной цепи

Согласно действующему законодательству РФ в сфере электроэнергетики каждый потребитель имеет право на получение качественной электроэнергии с необходимой степенью надежности. Основные показатели качества электроэнергии (ПКЭ) нормируются требованиями ГОСТ 32144-2013 [8].

В сетях свыше 1 кВ непосредственное включение приборов контроля ПКЭ в сеть контролируемого напряжения невозможно, их включают в сеть через измерительные трансформаторы напряжения. В результате, на результаты анализа качества электроэнергии существенное влияние оказывают метрологические характеристики TH.

В соответствии с [8] измерения и анализ ПКЭ должны проводиться в диапазоне до 40-й гармоники включительно, а значит исследование амплитуднофазовой частотной характеристики (АФЧХ) измерительных ТН для оценки точности передачи формы измеряемого сигнала является необходимым и актуальным.

Согласно проведенным исследованиям [58], нагрузка ТН в современных условиях приобретает нелинейный характер, что приводит к значительному искажению формы тока во вторичной цепи. Несинусоидальность вторичного тока приводит к искажению и формы кривой вторичного напряжения, как показано в [56, 59]. А это значит, что к высшим гармоникам вторичного напряжения, обусловленным несинусоидальностью первичного напряжения добавляются высшие гармоники, обусловленные нелинейностью нагрузки самого ТН и по форме вторичного напряжения уже нельзя судить о форме первичного.

Покажем это на примере схемы замещения ТН, приведенной на рисунке 3.14. Матрица гармоник напряжения *U*₂ определяется следующим выражением:

$$\left\| \dot{U}_{2(k)} \right\| = \left\| \dot{U}_{1(k)} \right\| - \left\| \Delta \dot{U}_{m(k)} \right\|.$$
(3.45)

91

Углы сдвига гармоник напряжения U_2 по отношению к напряжению U_1 , когда оно имеет несинусоидальную форму, (угловая погрешность TH) определяются по формуле:

$$\delta_{\varphi_{(k)}} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Im}(\dot{U}_{2(k)})}{\operatorname{Re}(\dot{U}_{2(k)})}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Im}(\dot{U}_{1(k)})}{\operatorname{Re}(\dot{U}_{1(k)})}\right).$$
(3.46)

Кривую напряжения U₂ можно построить по следующему выражению:

$$u_{2}(t) = \sum_{k=1}^{n} \left| \dot{U}_{2(k)} \right| \sin \left(k \omega t + \varphi_{U2(k)} \right).$$
(3.47)

Таким образом, форма напряжения U_2 будет определяться не только формой первичного напряжения, но и будет зависеть от формы падения напряжения на сопротивлениях обмоток TH, которая при нелинейной нагрузке TH, может быть несинусоидальной.

Для иллюстрации на рисунке 3.19 приведены кривые измеряемого напряжения U_1 и напряжения на выводах вторичной обмотки TH U_2 для случая, когда ток i_{α} имеет несинусоидальную форму под воздействием нелинейной нагрузки R_{μ} . Амплитуды гармоник тока и напряжений приведены в таблице 3.4. Фазы гармоник напряжения U_1 и тока i_{α} приняты равными нулю.

Номер гармоники	1	3	5
i_{lpha}, A	1,41	-1	-1
U_1, B	100	5	5
U_2, B	99,01	6,09	6,71

Таблица 3.4 – Спектр гармоник тока и напряжений

Как видно из рисунка, при наличии нелинейной нагрузки в цепи форма напряжения U_2 не совпадает с формой контролируемого напряжения U_1 . Присутствует как амплитудная, так и угловая погрешности. Амплитудные погрешности, как видно из данных таблицы 3.5 составили -0,99%; +21,8%; +34,2% соответственно для 1-й, 3-й и 5-й гармоник. Значения амплитудных и угловых погрешностей приведены в таблице 3.5.



Рисунок 3.19 – Форма кривых напряжений U₂ и U₁

Номер гармоники	1	3	5
δ_{U} , %	-0,99	+21,8	+34,2
δ_{arphi} , °	-0,58	20,4	31,8

Таблица 3.5 – Значения амплитудных и угловых погрешностей

При использовании TH с нелинейной нагрузкой во вторичной цепи для измерения и оценки качества электроэнергии необходимо учитывать, что на гармоники измеряемого несинусоидального напряжения будут накладываться гармоники, источником которых является нелинейная нагрузка самого TH, и результаты такого измерения не будут отражать реальные значения уровней гармоник в первичном напряжении. В качестве решения указанной проблемы можно рекомендовать для измерения ПКЭ использовать дополнительную обмотку TH, работающую на холостом ходу.

Выводы по главе:

1. Конструкция ТН и схема соединения его обмоток могут приводить к значительным искажением формы исследуемого напряжения, что необходимо учитывать при использовании трехфазных ТН для подключения приборов оценки качества электроэнергии и выбирать конструкции и схемы соединения обмоток с минимальным искажением формы исследуемого напряжения. 2. Произведен анализ нагрузок вторичных цепей ТН. Установлено, что нагрузка вторичных цепей ТН в современных условиях приобретает нелинейный характер из-за широкого применения электронной измерительной аппаратуры имеющей в своем составе импульсные блоки питания.

3. При протекании в цепи несинусоидального тока, потребляемая от источника полная мощность возрастает за счет реактивной мощности искажения, в то время как активная мощность, потребляемая нагрузкой, остается на том же уровне.

4. При работе ТН на нелинейную нагрузку, увеличение полной потребляемой нагрузкой мощности не приводит к увеличению амплитудной погрешности ТН, определенной по первой гармонике. При этом угловая погрешность может значительно отличаться от погрешности на первой гармонке.

5. В условиях эксплуатации недостаточно делать оценку пригодности использования ТН с нелинейной нагрузкой в заданном классе только по нагрузке первой гармоники. Обязательно проводить и оценку угловой погрешности по методике, изложенной в разделе 3.4.

6. Нелинейность нагрузки приводит к искажению формы вторичного напряжения ТН, в результате чего искажается и форма его АФЧХ. Это приводит к появлению значительных погрешностей как по амплитуде, так и по фазе, что недопустимо при анализе ПКЭ.

7. При анализе ПКЭ необходимо использовать ТН с дополнительной обмоткой, работающей на холостом ходу и оценивать качество напряжения по показаниям, снятым с этой обмотки.

4 Разработка устройства автоматической компенсации погрешностей трансформаторов напряжения

4.1 Разработка вольтодобавочного устройства

На основании полученных уравнений вычисления погрешностей ТН в режиме холостого хода (2.44), (2.45) и при нагрузке (2.53), (2.54) предложена система, в которой падения напряжения в обмотках ТН измеряются и добавляются к напряжению вторичной обмотки ТН.

Как было показано в главе 2, потери напряжения при холостом ходе легко компенсируются витковой коррекцией при производстве TH, а потери напряжения от нагрузки компенсируются соответствующей вольтодобавкой. Поэтому дальнейшее рассмотрение вопросов компенсации сосредоточено на компенсации погрешностей от нагрузки вторичной цепи TH.

Компенсация погрешностей ТН предусматривает обеспечение условия равенства приведенного напряжения на нагрузке первичному (измеряемому) напряжению \dot{U}_{l} , т.е.:

$$\dot{U}_{2\mu}' = \dot{U}_1. \tag{4.1}$$

Предлагаемый способ компенсации погрешностей подразумевает, что к фактическому напряжению во вторичной цепи ТН \dot{U}_2 прибавляется напряжение, равное потерям напряжения в обмотках трансформатора $\Delta \dot{U}_{\mu}$:

$$\dot{U}_1' = \dot{U}_{2\mu} = \dot{U}_2 + \Delta \dot{U}_{\mu}, \qquad (4.2)$$

$$\Delta U_{\mu} = I_2 Z_m = I_2 (R_m + jX_m).$$
(4.3)

Рассмотрены различные способы реализации этого условия. Был проанализирован вариант, когда вольтодобавка, равная падению напряжения в ТН при нагрузке, формируется схемой, показанной на рисунке 4.1 [60].



Рисунок 4.1 – Структурная схема TH с вольтодобавкой, сформированной нагрузкой вторичной цепи TT

В показанной схеме используется трансформатор тока (TT) измеряющий ток \dot{I}_2 вторичной обмотки TH. Во вторичную обмотку TT включены сопротивления R_m и X_m , пропорциональные сопротивлениям обмоток TH. На этих сопротивлениях формируется напряжение, пропорциональное падению напряжения в TH ($\Delta \dot{U}_n$), которое с помощью коэффициента усиления усилителя V и коэффициента трансформации вольтодобавочного трансформатора [42] выравнивается по амплитуде и фазе с $\Delta \dot{U}_n$ и подается во вторичную цепь TH. Таким образом реализуется уравнение (4.2).

Модель схемы (рисунок 4.1) построена в программном пакете NI Multisim. Её исследование показало, что она является неустойчивой автоматизированной системой. Добавочное напряжение $\Delta \dot{U}_{\mu}$ увеличивает \dot{U}_{2} , из-за чего возрастает ток \dot{I}_{2} , что приводит к увеличению $\Delta \dot{U}_{\mu}$ и т.д., т.е. система уходит в бесконечность.

Далее разрабатывался вариант предусматривающий формирование добавочного напряжения путем сравнения в измерительном операционном усилителе опорного напряжения (равного измеряемому напряжению) и фактического напряжения на нагрузке. В качестве опорного, предложено напряжение холостого хода дополнительной обмотки TH $\dot{U}_{3x} = \dot{U}_0$.

Функциональная схема, реализующая данный алгоритм компенсации представлена на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Функциональная схема алгоритма компенсации

Схема работает следующим образом. При подключении первичной обмотки 2 на измеряемое напряжение \dot{U}_1 сети высокого напряжения, в основной вторичной обмотке 3 трансформатора напряжения протекает ток нагрузки \dot{I}_2 , вызывающий падение напряжения $\Delta \dot{U}_m$ в обмотках 2 и 3 трансформатора напряжения.

Напряжение $\Delta \dot{U}_m$ вычитается из приведенного к основной вторичной обмотке 3 напряжения \dot{U}'_1 первичной обмотки 2, и на выходе основной вторичной обмотки 3 формируется напряжение \dot{U}_2 , не совпадающее с приведенным напряжением \dot{U}'_1 первичной обмотки 2, что обуславливает наличие погрешности трансформатора напряжения. Вектор $\Delta \dot{U}_m$ характеризует полную погрешность трансформатора напряжения как по амплитуде, так и по фазе.

В дополнительной вторичной обмотке 6 ток нагрузки не протекает, падение напряжения $\Delta \dot{U}_m$ в ней отсутствует, и на выходе формируется опорное напряжение \dot{U}_0 , равное приведенному напряжению \dot{U}_1 первичной обмотки 2.

На первый вход блока измерения погрешности 7 подаётся сигнал напряжения \dot{U}_0 с дополнительной вторичной обмотки 6, а на второй вход поступает сигнал напряжения \dot{U}'_2 с нагрузки Z_n 5. Блок измерения погрешности 7 вычитает сигнал \dot{U}'_2 из \dot{U}_0 и формирует на выходе сигнал $\Delta \dot{U}_m$, который усиливается усилителем 8 и поступает на вход вольтодобавочного трансформатора 4. Вольтодобавочный трансформатор 4 формирует вектор напряжения вольтодобавки $\Delta \dot{U}_{вдm}$,

совпадающий с вектором $\Delta \dot{U}_m$, который складывается с вектором напряжения \dot{U}_2 основной вторичной обмотки 3, формируя напряжение \dot{U}_2 на нагрузке Z_{μ} 5.

Вектор напряжения \dot{U}_{2} сформированного предлагаемой схемой на нагрузке Z_{H} 5 совпадает с вектором приведенного напряжения \dot{U}_{1} первичной обмотки 2, строго соответствующем вектору измеряемого напряжения \dot{U}_{1} , а значит амплитудная и угловая погрешность при измерении напряжения отсутствуют.



Рисунок 4.3 – Нагрузочная характеристика многообмоточного ТН. 1 - зависимость напряжения холостого хода (XX) на дополнительной обмотке от нагрузочного тока основной обмотки; 2 - нагрузочная характеристика основной обмотки при работе дополнительной обмотки на холостом ходу

Однако при наличии нагрузки основной обмотки, напряжение \dot{U}_0 на дополнительной обмотке будет отличаться от значения, когда обе обмотки TH работают без нагрузки (погрешность равна нулю) и поэтому \dot{U}_0 не будет равно первичному напряжению \dot{U}'_1 в измеряемой сети. Исследования показали [48], что при наличии нагрузки в основной обмотке (I_{2*}) напряжение холостого хода в дополнительной обмотке будет уменьшаться на величину падения напряжения в первичной обмотке TH $\Delta \dot{U}_{\mu l}$. Т.е. характер изменения погрешностей вторичных обмоток будет соответствовать графикам, которые представлены на рисунке 4.3.

Тогда, опорное напряжение, равное неизвестному нам первичному напряжению \dot{U}_1 можно формировать путем суммирования \dot{U}_{3x} с падением напряжения в первичной обмотке TH от нагрузочного тока \dot{I}_2 основной обмотки $\Delta \dot{U}_{\mu l}$:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_1' = \dot{U}_{3x} + \Delta \dot{U}_{u1}, \qquad (4.4)$$

$$\Delta \dot{U}_{_{H1}} = \dot{I}_2 Z_1 = \dot{I}_2 (R_1 + j X_1), \qquad (4.5)$$

где R_1 – активное сопротивление первичной обмотки; X_1 – индуктивное сопротивление первичной обмотки.



Рисунок 4.4 – Структурная схема TH с формированием вольтодобавки сравнением измеряемого напряжения с фактическим на нагрузке

Структурная схема, реализующая уточненный алгоритм, приведена на рисунке 4.4. Напряжение, равное падению напряжения в первичной обмотке TH $\Delta \dot{U}_{n1}$ в данной схеме реализуется вторичной цепью TT, включенного в основную вторичную обмотку. На входе усилителя V_1 два сигнала \dot{U}_{3x} и $\Delta \dot{U}_{n1}$ суммируются, образуя напряжение равное приведенному измеряемому напряжению \dot{U}'_1 . На входе усилителя V_2 формируется разность напряжения \dot{U}'_1 и фактического напряжения на нагрузке \dot{U}_{2n} , которая и является необходимой добавкой ЭДС $\Delta \dot{U}_n$. Напряжение вольтодобавки усиливается и передается через ВДТ во вторичную цепь, выполняя условие $\dot{U}'_{2n}=\dot{U}_1$.

Рассмотрим алгоритм компенсации подробнее. Как видно из схемы (рисунок 4.4), для напряжения вольтодобавки можно записать:

$$\Delta \dot{U}_{_{H}} = A \left(\dot{U}_{_{0}} - \dot{U}_{_{2_{H}}} \right), \tag{4.6}$$

где *А* – коэффициент усиления усилителя *У*₂.

Преобразуем выражение (4.6) с учетом (4.2):

$$\Delta \dot{U}_{\mu} = A \left(\dot{U}_{0} - \left(\Delta \dot{U}_{\mu} + \dot{U}_{2} \right) \right), \qquad (4.7)$$

$$\Delta \dot{U}_{\mu} = A \dot{U}_{0} - A \Delta \dot{U}_{\mu} - A \dot{U}_{2}, \qquad \Delta \dot{U}_{\mu} + A \Delta \dot{U}_{\mu} = A \left(\dot{U}_{0} - \dot{U}_{2} \right),$$

$$\Delta \dot{U}_{\mu} = \frac{A}{1+A} \left(\dot{U}_0 - \dot{U}_2 \right). \tag{4.8}$$

Будем считать, что усилитель *У*₂ имеет пренебрежимо малый фазовый сдвиг на частоте 50 Гц. Погрешность основной обмотки ТН можно выразить следующим образом:

$$\dot{U}_{e} = \dot{U}_{0} - \dot{U}_{2\mu}. \tag{4.9}$$

С учетом выражений (4.6) и (4.8) можно записать:

$$\Delta U_{\mu} = A U_{e},$$

$$\dot{U}_{e} = \frac{\Delta \dot{U}_{\mu}}{A} = \frac{\dot{U}_{0} - \dot{U}_{2}}{1 + A}.$$
 (4.10)

В отсутствии усилителя, погрешность измерения напряжения TH с нагрузкой *Z_н* будет определяться следующим выражением:

$$\dot{U}_{e} = \dot{U}_{0} - \dot{U}_{2}, \qquad (4.11)$$

Сравнивая выражения (4.10) и (4.11) можно сделать вывод, что погрешность ТН при наличии в схеме усилителя будет снижена с коэффициентом (1+*A*) как по амплитуде, так и по углу. Этот вывод можно иллюстрировать векторной диаграммой, приведенной на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Векторная диаграмма погрешностей ТН со схемой компенсации (Ú₂) и без схемы компенсации (Ú₂)

На векторной диаграмме: \dot{U}_2 – вектор вторичного напряжения TH со схемой компенсации; \dot{U}'_2 – вектор вторичного напряжения TH без схемы компенсации. Отрезки AC и AC' будут соответствовать амплитудным погрешностям TH соответственно с компенсацией и без компенсации погрешностей. Углы δ и δ' будут соответствовать угловым погрешностям TH соответственно с компенсацией и без компенсации погрешностей. Углы δ и δ' будут соответствовать угловым погрешностям TH соответственно с компенсацией и без компенсации погрешностей.

Исходя из подобия треугольников АВ'С' и АВС можно записать:

$$\frac{AB}{AB'} = \frac{AC}{AC'} = \frac{\dot{U}_e}{\dot{U}'_e} = \frac{\dot{U}_0 - \dot{U}_2}{1 + A} \cdot \frac{1}{\dot{U}_0 - \dot{U}_2} = \frac{1}{1 + A}, \qquad (4.12)$$

Тогда амплитудная погрешность ТН с компенсацией определяется как:

$$AC = AC' \frac{1}{1+A}.$$
 (4.13)

Обозначим относительную амплитудную погрешность TH с компенсацией как $\Delta U_{\mu}^{*} = AC/AO$ и относительную амплитудную погрешность TH без компенсации как $\Delta U_{\mu}^{'*} = AC'/AO$, тогда с учетом (4.13):

$$\frac{AC}{AO} = \frac{AC'}{AO} \frac{1}{1+A},$$

$$\Delta \dot{U}_{\mu}^{*} = \Delta \dot{U}_{\mu}^{\prime *} \frac{1}{1+A}.$$
(4.15)

Произведем аналогичные преобразования для угловой погрешности. Так как углы δ и δ' весьма малы, с допустимой степенью точности справедливы следующие равенства:

$$\delta = \frac{BC}{OC};$$

$$\delta' = \frac{B'C'}{OC'}.$$
(4.16)

Из подобия треугольников АВ'С' и АВС:

$$\frac{BC}{B'C'} = \frac{1}{1+A},$$
$$\frac{BC}{OC} = \frac{B'C'}{OC} \frac{1}{1+A} \approx \frac{B'C'}{OC'} \frac{1}{1+A}$$

С учетом (4.16) получим:

$$\delta \approx \delta' \frac{1}{1+A} \,. \tag{4.17}$$

Из выражений (4.15) и (4.17) видно, что амплитудная и угловая погрешности ТН с устройством компенсации по сравнению с погрешностями ТН без компенсации меньше в величину коэффициента усиления (1 + *A*) раз.

Коэффициент усиления усилителя на частоте *f* :

$$\dot{A} = \frac{\dot{A}_0}{\dot{A}_0 \beta + 1},$$
(4.18)

где β – коэффициент обратной связи; $\dot{A_0}$ – комплексный коэффициент усиления усилителя с разомкнутой петлей обратной связи. Для схемы, состоящей из операционного усилителя (ОУ) типа 741 [61] и выходного каскада усиления мощности:

$$\dot{A}_0 \approx \frac{10^5}{1+j\left(\frac{f}{10}\right)},$$

при $\beta = 1/100$, $A = 100 \bot -17,3$ ', на частоте f = 50 Гц.

В результате небольшого сдвига по фазе, вносимого коэффициентом усиления *A*, вектор погрешности с усилителем не будет совпадать с вектором *AB* на рисунке 4.4. Но данный вектор наклонен относительно *AB* на малый угол, и его влияние на амплитудную и угловую погрешности будет ничтожно.

Выходное сопротивление усилительного контура V_2 приблизительно равно величине R_0/A , где R_0 – это выходное сопротивление каскада усиления мощности, который состоит из пары *n-p-n* и *p-n-p* транзисторов в классе *AB*, включенных по схеме двухтактного эмиттерного повторителя [62] (см. рисунок 4.5). Таким образом, выходное сопротивление будет очень низким по сравнению с сопротивлением нагрузки, а значит, усилитель V_2 в цепи ведет себя как управляемый источник напряжения. Результирующий коэффициент усиления контура будет практически равен единице.

Конденсатор *С* в цепи обратной связи обеспечивает функцию интегрирующего звена, для поддержания напряжения вольтодобавки на выходе ОУ.



Рисунок 4.6 – Схема двухтактного эмиттерного повторителя

Приведенная на рисунке 4.4 схема автоматической компенсации погрешностей ТН может работать и при условии, когда дополнительная обмотка так же нагружена. В этом случае, во вторичные цепи обеих обмоток включаются TT, которыми формируются падения напряжения в обмотках TH. Сформированные напряжения суммируются с напряжением \dot{U}_2 компенсируемой обмотки и формируют опорное напряжение, равное \dot{U}'_1 . Схема, реализующая данный алгоритм приведена на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Структурная схема ТН с вольтодобавкой при работе дополнительной обмотки под нагрузкой

Так как обе вторичные обмотки ТН находятся под нагрузкой, для формирования опорного напряжения в схему включен дополнительный

103

маломощный трансформатор напряжения TH1, первичная обмотка которого включена на вторичное напряжение основной обмотки \dot{U}_2 TH. На выходе TH1 создается напряжение $\dot{U}'_2 = \dot{U}_2/K_{m1}$, где K_{m1} – коэффициент трансформации трансформатора TH1. Амплитуда \dot{U}'_2 и соответственно значение K_{m1} подбираются такими, чтобы обеспечить оптимальный уровень опорного напряжения на входе операционного усилителя.

Опорное напряжение, равное измеряемому первичному напряжению \dot{U}_1 формируется путем суммирования \dot{U}_2 с падением напряжения в первичной обмотке TH от нагрузочного тока \dot{I}_3 дополнительной обмотки $\Delta \dot{U}_{\mu I(3)}$ и с падением напряжения в первичной и вторичной обмотках TH от нагрузочного тока \dot{I}_2 основной обмотки $\Delta \dot{U}_{\mu(2)}$.

Для формирования $\Delta \dot{U}_{h1(3)}$ и $\Delta \dot{U}_{h(2)}$ во вторичные цепи основной и дополнительной обмоток TH включены трансформаторы тока TT1 и TT2. С учетом коэффициентов трансформации TT1 и TT2 можно записать:

$$\dot{U}_0' = \dot{U}_2' + \Delta \dot{U}_{\mu(3)}' + \Delta \dot{U}_{\mu(2)}', \qquad (4.19)$$

$$\Delta \dot{U}'_{\mu_{1(3)}} = \dot{I}'_{3}Z_{1} = \dot{I}'_{3}(R_{1} + jX_{1}) = \frac{\dot{I}_{3}}{K_{mm2}}(R_{1} + jX_{1}) = \frac{\Delta \dot{U}_{\mu_{1(3)}}}{K_{mm2}}, \qquad (4.20)$$

$$\Delta \dot{U}'_{_{H(2)}} = \dot{I}'_{2}Z = \dot{I}'_{2}(R + jX) = \frac{\dot{I}_{2}}{K_{_{mm1}}}(R + jX) = \frac{\Delta \dot{U}_{_{H1(2)}}}{K_{_{mm1}}}, \qquad (4.21)$$

где R – суммарное активное сопротивление обмоток TH; X – суммарное индуктивное сопротивление обмоток TH; R_1 – активное сопротивление первичной обмотки TH; X_1 – индуктивное сопротивление первичной обмотки TH; K_{mm1} , K_{mm2} – коэффициенты трансформации трансформаторов тока TT1 и TT2 соответственно.

Напряжение \dot{U}'_2 можно определить следующим образом:

$$\dot{U}_{2}' = \frac{\dot{U}_{2}}{K_{m1}} = \frac{\dot{U}_{1}' - \Delta \dot{U}_{\mu}}{K_{m1}} = \frac{\dot{U}_{1}' - \Delta \dot{U}_{\mu(3)} - \Delta \dot{U}_{\mu(2)}}{K_{m1}}, \qquad (4.22)$$

Тогда для приведенного значения опорного напряжения \dot{U}'_0 с учетом выражения (4.19) можно записать:

$$\dot{U}_{0}' = \frac{\dot{U}_{1}'}{K_{m1}} - \frac{\Delta \dot{U}_{\mu(3)}}{K_{m1}} - \frac{\Delta \dot{U}_{\mu(2)}}{K_{m1}} + \frac{\Delta \dot{U}_{\mu(3)}}{K_{mm2}} + \frac{\Delta \dot{U}_{\mu(2)}}{K_{mm1}} \,. \tag{4.23}$$

Из выражения (4.23), при равенстве коэффициентов трансформации $K_{m1} = K_{mm1} = K_{mm2}$, справедливо следующее равенство:

$$\dot{U}_0' = \frac{\dot{U}_1'}{K_{m1}}.$$
(4.24)

Таким образом, опорное напряжение \dot{U}'_0 точно соответствует приведенному значению измеряемого первичного напряжения \dot{U}'_1 .

Так как входное сопротивление операционного усилителя V_1 велико, ток I_0 , протекающий во вторичной цепи TH1, мал. Мощность TH1, которая определяется как $\dot{I}_0 \cdot \dot{U}'_2$, будет так же не велика и стоимость TH1 будет низкой по сравнению со стоимостью TH. Поэтому применение вспомогательного трансформатора напряжения в схеме компенсации незначительно скажется на её полной стоимости.

Вольтодобавочный трансформатор является источником напряжения, эквивалентного погрешности ТН с коэффициентом трансформации равным единице. Через него протекает нагрузочный ток, поэтому его мощность будет определяться выражением:

$$S_{BJT} = \dot{I}_2 \Delta \dot{U}_{\mu} \,. \tag{4.25}$$

Так как $\Delta \dot{U}_{\mu}$ составляет 1 – 2% от \dot{U}_2 , соответственно мощность ВДТ можно с учетом запаса принять не более 5% от мощности компенсируемого ТН.

Согласно выше описанному алгоритму была разработана принципиальная схема устройства автоматической компенсации погрешностей ТН. Разработанная схема приведена на рисунке 4.8.

В данной схеме трехобмоточный измерительный ТН с коэффициентом трансформации 1000:10:10 подключен к источнику синусоидального напряжения $U_1 = 10$ кВ. Активные сопротивления основной и дополнительной вторичных обмоток ТН смоделированы резисторами R2 = R3 = 1,00м. Реактивные сопротивления – соответственно индуктивностями L2 = L3 = 3,0мГн. Сопротивления первичной обмотки учтены резистором R1 = 10000м и индуктивностью L1 = 3Гн. Заданная величина номинального вторичного тока I_{2n}^{2}

 $I_{3\mu}^{\cdot} = 5$ А. При заданных сопротивлениях обмоток напряжение короткого замыкания составляет $U_{\kappa} = 6,0\%$.



Рисунок 4.8 – Принципиальная схема устройства автоматической компенсации погрешностей ТН

Во вторичные цепи обмоток TH включены трансформаторы тока TT1 и TT2 с коэффициентом трансформации 1:100. К выходу основной вторичной обмотки подключен маломощный трансформатор напряжения TH1 с коэффициентом трансформации 100:1. Во вторичных цепях TT1 и TT2 протекают токи \dot{I}'_2 и \dot{I}'_3 пропорциональные нагрузочным токам соответственно \dot{I}_2 основной обмотки и \dot{I}_3 дополнительной обмотки:

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{I}_2}{K_{mm1}};$$
$$\dot{I}_3' = \frac{\dot{I}_3}{K_{mm2}}.$$

Резистор *R4* и индуктивность *L4* в цепи TT1 повторяют полное сопротивление обмоток трансформатора TH:

$$R4 = \frac{R_1}{K_{mH}^2} + R_2 = \frac{1000}{100^2} + 1 = 1,1OM,$$
$$L4 = \frac{L_1}{K_{mH}^2} + L_2 = \frac{3000 \cdot 10^{-3}}{100^2} + 3 \cdot 10^{-3} = 3,3M\Gamma H$$

Резистор *R5* и индуктивность *L5* в цепи TT2 повторяют сопротивление первичной обмотки трансформатора TH, так как потери напряжения в дополнительной обмотке TH от её нагрузочного тока не влияют на напряжение \dot{U}_2 основной обмотки:

$$R5 = \frac{R_1}{K^2_{mH}} = \frac{1000}{100^2} = 0,1O_M,$$
$$L5 = \frac{L_1}{K^2_{mH}} = \frac{3000 \cdot 10^{-3}}{100^2} = 0,3M\Gamma H$$

При протекании токов \dot{I}_{2} и \dot{I}_{3} через *R4*, *L4* и *R5*, *L5* падения напряжения на этих сопротивлениях равны приведенным значениям падений напряжения на обмотках ТН $\Delta \dot{U}_{h1(2)}$ и $\Delta \dot{U}_{h(3)}$. Опорное напряжение \dot{U}_{0} , получаемое сложением напряжений $\Delta \dot{U}_{h1(2)}$ и $\Delta \dot{U}_{h(3)}$ и напряжения \dot{U}_{2} на выходе ТН1, подается на инвертирующий вход 2 операционного усилителя *U1*. Для данной схемы выбран широко распространённый ОУ типа 741 [61] с замкнутой петлей обратной связи.

Согласно выражению (4.24) опорное напряжение $\dot{U'}_0$ имеет следующий уровень:

$$\dot{U}'_0 = \frac{\dot{U}'_1}{K_{m1}} = \frac{\dot{U}_1}{K_{mn} \cdot K_{m1}} = \frac{10000}{100 \cdot 100} = 1,0B$$

Фактическое напряжение на нагрузке $\dot{U}_{2\mu}$ поступает на не инвертирующий вход 3 ОУ. Уровень $\dot{U}_{2\mu}$ для исключения насыщения ОУ должен соответствовать уровню опорного напряжения, что обеспечивается делителем, который выполнен на резисторах R6 = 10кОм и R7 = 100Ом и имеет коэффициент деления 1:100.

Резисторами R8 = 1400м и R9 = 470кОм определяется коэффициент обратной связи схемы усиления. Конденсатор C1 = 1мкФ обеспечивает функцию интегрирующего звена, для поддержания напряжения вольтодобавки на выходе ОУ, а так же обеспечивает фильтрацию высших гармоник на инвертирующем входе ОУ при работе схемы на емкостную нагрузку.

Коэффициент усиления схемы определяется параметрами цепи обратной связи и находится согласно следующему выражению [63]:

$$A = 1 + \frac{R9}{R8} = 1 + \frac{470 \cdot 10^3}{140} \approx 3358.$$

Выходной усилитель мощности выполнен по схеме двухтактного эмиттерного повторителя [62] на транзисторах: *Q1* типа BD137, *Q2* – BD138, *Q3* – BD179 и *Q4* – BD180.

Напряжение с выхода схемы усиления, равное $\Delta \dot{U}_{\mu}$, подается на вольтодобавочный трансформатор T2, который имеет коэффициент трансформации 1:1 и добавляется к фактическому напряжению на нагрузке $\dot{U}_{2\mu}$, обеспечивая его равенство первичному измеряемому напряжению согласно выражению (4.1).

Отличительной особенностью предлагаемой схемы по сравнению с зарубежными аналогами [34-38] является формирование напряжения компенсации на вольтодобавочном трансформаторе. Такое решение обеспечивает надежную работу компенсированного ТН. В данной схеме при выходе из строя блока компенсации, компенсированный ТН продолжит работать (но уже без компенсации), т.к. цепь вторичной обмотки остается замкнута через вторичную обмотку ВДТ. В схемах без ВДТ, при выходе из строя схемы компенсации, размыкается цепь вторичной обмотки ТН и он так же выходит из работы, что может привести не только к значительному недоучету электроэнергии, но и к выводу из работы устройств РЗиА, что не допустимо.

Для сигнализации неисправности работы самого компенсирующего устройства в цепи первичной обмотки ВДТ предусматривается включение трансформатора тока *TA1*. При отсутствии тока в цепи первичной обмотки ВДТ, отсутствует ток и во вторичной обмотке *TA1*. Так как критерием исправной работы компенсирующего устройства является наличие тока в цепи ВДТ, отсутствие тока является условием для срабатывания сигнализирующего устройства.

Данная схема была протестирована в программном комплексе NI Multisim для различных вариантов величины и характера нагрузки. На рисунке 4.9 приведены зависимости амплитудной и угловой погрешностей, снятые для TH со схемой и без схемы компенсации для случая активной нагрузки с соs = 1,0. Для других вариантов нагрузки аналогичные зависимости приведены в приложении 2.
Для проверки работоспособности схемы были проведены физические эксперименты на базе маломощного трансформатора типа TA19 220/112B мощностью 26Bt [49]. Погрешности исследуемого TH без компенсации составили 0,04% и 0,5', при нагрузке его номинальным током с соsφ = 1,0. Погрешности TH при нагрузке были измерены со схемой и без схемы компенсации при различных уровнях первичного напряжения. Результаты приведены в таблице 1. Погрешности TH со схемой компенсации оказались меньше предела чувствительности измерительных приборов. Общий вид макета представлен на рисунке 4.10.



Рисунок 4.9 – Зависимость погрешностей амплитудной (а) и угловой (б) экспериментального ТН от нагрузки: *1* – Для ТН с компенсацией погрешностей; *2* – Для ТН без компенсации погрешностей

Таблица 4.1 – Результаты экспериментального исследования погрешностей ТН типа ТА19 220/112В со схемой и без схемы компенсации.

Первичное	Амплитудная п	югрешность, %	Угловая погрешность (мин.)			
напряжение, %	Без компенсации	С компенсацией (А=100)	Без компенсации	С компенсацией (А=100)		
60	-5,287	-0,005	-17,82	-0,02		
80	-5,282	-0,005	-16,30	-0,02		
100	-5,285	-0,005	-12,85	-0,01		
120	-5,36	-0,005	+9,85	-0,01		



Рисунок 4.10 – Общий вид TH с компенсацией погрешностей на базе маломощного трансформатора типа TA19 220/112B

Таким образом, что на основе схемы, описанной выше, можно построить относительно недорогой измерительный трансформатор напряжения на основе стандартного силового трансформатора для широкого диапазона нагрузок.

Структурную схему, представленную на рисунке 4.3, можно так же использовать при работе дополнительной обмотки под нагрузкой если перевести дополнительную обмотку в режим холостого хода путем её разгрузки с помощью активного измерительного трансформатора (АИТ). Структурная схема, реализующая подобный алгоритм представлена на рисунке 4.11. Подробное описание работы АИТ производится в следующем разделе.



Рисунок 4.11 – Структурная схема ТН с формированием опорного напряжения путем разгрузки дополнительной обмотки

4.2 Разработка активного измерительного трансформатора для частичной разгрузки измерительных трансформаторов напряжения

Всемерная разгрузка трансформаторов напряжения, точнее, перевод их в режим оптимальной нагрузки является одним из методов повышения точности TH, минимизирующим погрешность с оптимальным соs , заданным заводом изготовителем [21].

Радикальный способ разгрузки ТН – это перенос части его нагрузки на другой ТН. Но такое решение нельзя считать рациональным, так как установка дополнительного ТН требует значительных финансовых затрат.

Данным проектом предусматривается следующее решение – частичная разгрузка трансформатора напряжения до оптимальной загрузки путем подключения отдельных потребителей этого ТН через специальные активные измерительные трансформаторы (АИТ) 100/100В с высоким входным и низким выходным сопротивлениями и с автономным питанием каждого АИТ от цепей оперативного тока того потребителя, чьи цепи напряжения он обеспечивает. В устройство обеспечивает результате, предлагаемое возможность работы измерительных трансформаторов напряжения в наивысшем классе точности с минимальной нагрузкой.

Функциональная схема предлагаемого устройства приведена на рисунке 4.12.



Рисунок 4.12 – Структурная схема активного измерительного трансформатора

АИТ (на рисунке под цифрой 1) состоит из оперативного усилителя 2 (ОУ), включенного по схеме повторителя напряжения, и усилителя мощности выходного сигнала 3 (УМ). На вход АИТ подается напряжение U_2 со вторичной обмотки TH, пропорциональное измеряемому напряжению U₁. Операционным усилителем 2 на выходе АИТ формируется напряжение, равное по амплитуде и фазе напряжению U₂. Так как входное сопротивление ОУ велико, ток на входе АИТ, протекающий во вторичной цепи ТН, очень мал. Выходное сопротивление АИТ мало и определяется выходным сопротивлением усилителя мощности, который обеспечивает необходимую величину тока, потребляемого подключенной к АИТ нагрузкой. Питание АИТ обеспечивается от цепей оперативного тока подстанции. Таким образом, обеспечивается включение нагрузки на напряжение U₂, повторяющее напряжение на выходе вторичной обмотки ТН, при том, что мощность нагрузки потребляется из цепей оперативного тока.

Снижение нагрузочного тока во вторичной обмотке приводит к повышению класса точности работы ТН. А при включении АИТ в непосредственной близости от обслуживаемой нагрузки обеспечивается и снижение потерь напряжения в соединительных проводах.

Для того, чтобы надежность цепей напряжения не пострадала, обязательным требованием к АИТ является наличие устройства его автоматического шунтирования 4 в случае пропадания питающего напряжения U_{num} из цепи оперативного тока подстанции. В этом случае, потеря устройства, если таковая случится, сказывается только на точности замера напряжения, но не влияет на надежность цепи напряжения и подключенных к ней устройств.

Целесообразно подключать через АИТ только наиболее мощные потребители, например, устройства РЗиА (Z_{HI}), которые создают наибольшую нагрузку для ТН, а маломощные потребители, такие как измерительные приборы и счетчики (Z_{H2}), можно подключать к цепям напряжения непосредственно.

При этом собственная погрешность работы АИТ 100/100В большого значения не имеет, так как они обслуживают потребителей, таких как релейная защита, автоматика, телемеханика, которые не нуждаются в высокой точности измерений. Вполне достаточной является недорого достигаемая точность порядка 1%.

Согласно выше описанному алгоритму была разработана принципиальная схема АИТ для устранения погрешностей ТН и собран макетный образец устройства. Разработанная схема приведена на рисунке 4.13. Общий вид макета представлен на рисунке 4.14.



Рисунок 4.13 – Принципиальная схема активного измерительного трансформатора

Данная схема была протестирована в программном комплексе NI Multisim для различных вариантов величины и характера нагрузки. Результаты экспериментов показали удовлетворительную работу схемы.

Схема предлагаемого устройства отличается простотой и позволяет при массовом выпуске обеспечить низкую себестоимость АИТ, что позволит производить модернизацию измерительных комплексов с минимальными затратами.



Рисунок 4.14 – Общий вид активного измерительного трансформатора Выводы по главе:

1. Разработаны различные варианты схемных решений автоматической компенсации погрешностей и проведено их компьютерное моделирование в программном комплексе NI Multisim. Дана оценка всем рассмотренным вариантам и определены наиболее эффективные.

2. Представлен алгоритм автоматической компенсации погрешностей ТН, обеспечивающий компенсацию нагрузочных погрешностей при любом характере нагрузки.

3. Разработана методика выбора параметров элементов систем автоматической компенсации погрешностей.

4. Изготовлены макетные образцы устройств автоматической компенсации погрешностей ТН и проведены их лабораторные испытания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решены задачи, имеющие существенное значение для повышения точности измерения, учета и анализа качества напряжения в распределительных сетях 6-35кВ.

В ходе диссертационного исследования получены следующие результаты:

1. Предложенная методика позволяет рассчитывать фактическую величину нагрузочных погрешностей ТН в условиях эксплуатации исходя из параметров, приводимых в его паспорте.

2. Произведена оценка погрешностей основной обмотки многообмоточных ТН при нагрузке дополнительных обмоток. Показано, что, если нагрузить дополнительную обмотку мощностью, равной мощности основной обмотки, погрешность основной обмотки увеличится не более чем на 50%.

3. Установлено, что нагрузка вторичных цепей ТН в современных условиях эксплуатации приобретает нелинейный характер из-за широкого применения электронной измерительной аппаратуры, что приводит к искажению формы тока во вторичных цепях ТН.

4. Разработана методика определения погрешностей ТН при нелинейной нагрузке его вторичных цепей, позволяющая рассчитать фактический уровень амплитудной и угловой погрешностей измерения напряжения исходя из амплитуды и фазы гармонических составляющих нагрузочного тока.

5. Установлено, что нелинейность нагрузки приводит к искажению формы вторичного напряжения ТН, в результате чего искажается и форма его АФЧХ. Это приводит к появлению значительных погрешностей как по амплитуде, так и по фазе, что недопустимо при анализе ПКЭ.

6. Предложены рекомендации для исключения влияния погрешностей ТН на результаты измерения и анализа ПКЭ.

7. Разработаны алгоритмы автоматической компенсации погрешностей ТН, обеспечивающие компенсацию нагрузочных погрешностей при любом характере нагрузки.

8. Представлена конструкция устройства автоматической компенсации погрешностей ТН, обеспечивающего возможность работы измерительного трансформатора в заданном классе точности при нагрузке, равной максимальной по условиям нагрева, т.е. при более эффективном расходе активных материалов.

9. Разработана конструкция активного измерительного трансформатора для частичной разгрузки TH, обеспечивающего работу TH с минимальной нагрузкой в наивысшем классе точности без необходимости замены и модернизации самих TH.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АИТ	активный измерительный трансформатор
АФЧХ	амплитудно-фазовая частотная характеристика
BAX	вольтамперная характеристика
ВДТ	вольтодобавочный трансформатор
ИК	измерительный комплекс
ИТ	измерительный трансформатор
КЗ	короткое замыкание
НИИ	научно-исследовательский институт
НИР	научно-исследовательская работа
НПП	научно-производственное предприятие
ОУ	операционный усилитель
ΠΑΟ	публичное акционерное общество
ПКЭ	показатели качества электроэнергии
ПС	подстанция
РЗиА	релейная защита и автоматика
РУ	распределительное устройство
TH	трансформатор напряжения
TT	трансформатор тока
УМ	усилитель мощности
XX	холостой ход
ЭДС	электродвижущая сила
ЭЭС	электроэнергетические системы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 1983-2001. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия [Текст]. – Введ. 2003–01–01. – М.: Стандартинформ, 2006.

 ГОСТ 1516.1-76. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции [Текст]. – Введ. 1978–01–01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999.

 ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции [Текст]. – Введ. 1999–01–01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.

4. ГОСТ 721-77. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В [Текст]. – Введ. 1978–07–01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.

5. РД 34.11.321-96. Нормы погрешности измерений технологических параметров тепловых электростанций и подстанций [Текст]. – М.: ВТИ, 1997.

6. РД 34.09.101-94. Типовая инструкция по учету электроэнергии при ее производстве, передаче и распределении [Текст]. – Введ. 1995–01–01. – М.: НЦ ЭНАС, 2004.

7. РД 34.11.333-97. Типовая методика выполнения измерений количества электрической энергии [Текст]. – Введ. 1997–06–01. – М.: НЦ ЭНАС, 1999.

8. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – Введ. 2014–07–01. – М.: Стандартинформ, 2014.

9. Раскулов Р. Ф. Анализ условий работы измерительных трансформаторов и исследование влияний воздействующих факторов на точностные характеристики трансформаторов в энергосистемах [Текст] : дис. канд. тех. наук : 05.14.02 / Раскулов Радик Фаридович. – М., 2004. – 197 с.

10. Раскулов Р. Ф. Трансформаторы напряжения 3–35 кВ Факторы, влияющие на погрешности [Текст] / Р. Ф. Раскулов // Новости ЭлектроТехники. – 2011. – №1(67).

11. **Терехова А. И.** Влияние внешних факторов сети на погрешности трансформаторов напряжения [Текст] / А. И. Терехова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – №5-6. – С. 150-154.

12. Терехова А. И. Погрешности измерительных трансформаторов напряжения [Текст] / А. И. Терехова, А. Е. Усачев, Ф. Ф. Муллин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – №7-8. – С. 94-100.

13. **Park J. H.** Fehlergrößen des Stromwandless Einfluß der Wellenform des Primärsromes. – ATM, 1938. – v. 153.

14. **Савина Н. В.** Влияние качества электроэнергии на погрешность измерительных трансформаторов тока и напряжения [Текст] / Н. В. Савина, М. А. Сухомесов // Электричество. – 2008. – №11. – С. 6–11.

15. **Миронюк Н. Е.** [и др.] Влияние искажений синусоидальной формы кривых тока и напряжения на погрешности измерительных трансформаторов [Текст] // Электричество. – 2005. – № 2. – С. 31–36.

16. Расулов Т. М. Методика расчета погрешности измерительного трансформатора напряжения при несинусоидальном напряжении [Текст] / Т. М. Расулов, О. Ю. Быков, О. Ю. Везиров // Электротехника. – 1982. – № 11. – С. 54-56.

17. ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009). Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств [Текст]. – Введ. 2014–01–01. – М.: Стандартинформ. – 2013.

18. Старцев А. П. Экспериментальное исследование метрологических параметров измерительных трансформаторов напряжения [Текст] : дис. канд. тех. наук : 05.09.01 / Старцев Александр Павлович. – Екатеринбург, 2000.

19. РД 153-34.0-15.501-00. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Часть 1. Контроль качества электрической энергии [Текст]. – Введ. 2001–01–01. – М.: Энергосервис, 2004.

20. Широков О. Г. Исследование частотных свойств трансформаторов напряжения НОМ-6 / О. Г. Широков, О. В. Лымарь // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2009. – № 2. – С. 98-104.

21. Загорский Я. Т. Метрологическое обеспечение измерений для учета электроэнергии [Текст] / Я. Т. Загорский // Новости ЭлектроТехники. – 2003. – №3(21).

22. Дымков А. М. [и др.] Трансформаторы напряжения [Текст] / А. М. Дымков. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975.

23. Вавин В. Н. Трансформаторы напряжения и их вторичных цепи [Текст] /
В. Н. Вавин. – изд. 2-е, перераб и доп. – М.: Энергия, 1977. – 104 с.

24. Усачев А. Е. Совершенствование системы учета электроэнергии в ОАО «Татэнерго» [Текст] / А. Е. Усачев, Ф. Ф. Муллин, А. И. Терехова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2006. – №11-12. – С. 20-24.

25. Алексеев А. А. Косвенное определение погрешностей измерительных трансформаторов напряжения [Текст] / А. А. Алексеев, А. А. Панин, А. Г. Тобиас, Д. Н. Шаронов // Электрические станции. – 1990. – №6. – С. 61–64.

26. Малый А. С. Устройство для симметрирования нагрузки трансформатора напряжения [Текст] / А. С. Малый // Электрические станции. – 1991. – №4. – С. 74–78.

27. Малый А. С. Емкостная компенсация погрешностей трансформаторов напряжения [Текст] / А. С. Малый // Электрические станции. – 1991. – №5. – С. 28–34.

28. Малый А. С. Выравнивание нагрузки и емкостная компенсация погрешностей трансформаторов напряжения, включенных по схеме открытого треугольника [Текст] / А. С. Малый // Электрические станции. – 1995. – №9. – С. 23–31.

29. А.с. 1755208 СССР. Устройство компенсации погрешностей трехфазных трехпроводных счетчиков трансформаторного включения [Текст] // Малый А.С. – №4806897/21; заявл. 27.03.1990; опубл. 15.08.1992, Бюл. №30.

30. Пат. № 2000575 Российская Федерация. Устройство компенсации погрешностей трехфазных трехпроводных счетчиков трансформаторного включения [Текст] // Малый А.С. – №4928575/21; заявл. 21.03.1991; опубл. 07.09.1993, Бюл. №33–36.

31. Малый А. С. Устранение недоучёта электроэнергии, обусловленного погрешностями трансформаторов напряжения [Текст] / А. С. Малый // Современные методы и средства расчёта, нормирования и снижения технических и коммерческих потерь электроэнергии в электрических сетях. – М.: НЦ ЭНАС, 2000.

32. А.с. 1205034 СССР. Измерительный трансформатор напряжения [Текст] // Мигунов А.Л., Козин М.П. – №3621507/24-21; заявл. 13.07.1983; опубл. 15.01.1986, Бюл. №2.

33. А.с. 1422252 СССР. Магнитоэлекронный измерительный трансформатор напряжения [Текст] // Гусев В.Г. – №4225679/24-07; заявл. 08.04.1987; опубл. 07.09.1988, Бюл. №33.

34. **P. Sankaran P. Kanagasabapathy and V.G.K. Murti** Electronic errorcompensation of a voltage transformer // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1979. – Vol. 28. – P. 86-88.

35. **D. Slomovitz** Electronic compensation of Voltage Transformer // IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. – 1988. – Vol. 37. – No. 4. – P. 652-654.

36. **D. Slomovitz** Electronic Based High-Voltage Measuring Transformers // IEEE Transactions on power delivery. – 2002. – Vol. 17. – No. 2. – P. 359-361.

37. **A. Baccigalupi, A. Liccardo** A Low Cost Device for the Compensation of Voltage Transformers // IMTC 2008 - Instrumentation and Measurement Technology Conference Vancouver Island, British Columbia, Canada, May 12-15. – 2008.

38. Hyewon Lee, Jong-Min Park Development of a Compensation Scheme for a Measurement Voltage Transformer Using the Hysteresis Characteristics of a Core // Energies 2015. – N_{2} 8. – P. 3245-3257.

39. Афанасьев В. В. Трансформаторы тока [Текст] / В. В. Афанасьев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.

40. Пат. № 2265253 Российская Федерация. Трансформатор для уменьшения погрешности трансформаторов напряжения, находящихся в эксплуатации / Арсон А. Г. – Опубл. 2005, Бюл. №33.

41. **Артемов А. И.** Анализ методов компенсации погрешностей измерительных трансформаторов напряжения [Текст] / А. И. Артемов, В. А. Левченков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2007. – №3. – С. 35–37.

42. Артемов А. И. Компенсация погрешностей трансформаторов напряжения 6-10 кВ с помощью вольтодобавочных трансформаторов [Текст] / А. И. Артемов, В. А. Левченков, А. Г. Сидоров // Труды Международного Форума по вопросам науки, техники и образования. Т. 2 / под. ред. В. П. Савиных, В. В. Вишневского – М.: Академия Наук о Земле, 2005. – С. 133–134.

43. Дымков А. М. Расчет и конструирование трансформаторов [Текст] / А. М. Дымков. – М.: Высшая школа, 1971.

44. Стародубцев Ю. Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности [Текст] / Ю. Н. Стародубцев. – М.: ИП РадиоСофт, 2005. – 305 с.

45. Стародубцев Ю. Н. Измерительные трансформаторы напряжения [Текст] / Ю. Н. Стародубцев // ГАММАМЕТ ИНФОРМ. – 1999. – №5.

46. **Артемов А. И.** Современные трансформаторы напряжения и их вторичные цепи. Учебное пособие [Текст] /А. И. Артемов. – Смоленск: РИО филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске. – 234 с.

47. Андреенков Е. С. Расчет фактических погрешностей трансформаторов напряжения в условиях эксплуатации [Текст] / Е. С. Андреенков, А. И. Артемов // Информационные технологии, энергетика и экономика. Сборник трудов V

Международной научно-технической конференции: В 2 томах. филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске. – Смоленск: Универсум, 2015. – С. 3-6.

48. Андреенков Е.С. Уточнение погрешностей трехобмоточных трансформаторов напряжения [Текст] / Е. С. Андреенков, А. И. Артемов // Информационные технологии, энергетика и экономика. Сборник трудов XII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. В 3-х томах. – Смоленск: Универсум, 2015. – С. 6-10.

49. Сидоров И.Н. Трансформаторы бытовой радиоэлектронной аппаратуры: Справочник [Текст] / И. Н. Сидоров, С. В. Скорняков. – М.: Радио и связь, 1994. – 320 с.

50. **Минин Г. П.** Несинусоидальные токи и их измерение [Текст] / Г. П. Минин. – М: Энергия, 1979.

51. Андреенков Е. С. Трансформатор напряжения как нелинейный элемент [Текст] / Е. С. Андреенков, А. И. Артемов // Информационные технологии, энергетика и экономика. Сборник трудов V Международной научно-технической конференции: В 2 томах. филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске. – Смоленск: Универсум, 2015. – С. 6-11.

52. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. [Текст] / Л. А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.

53. Русин Ю. С. [и др.] Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры: Справочник [Текст] / Ю. С. Рудин, И. Я. Гликман, А. Н. Горский. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.

54. ГОСТ 26615-85. Провода обмоточные с эмалевой изоляцией. Общие технические условия [Текст]. – Введ. 1988–01–01. – М.: Издательство стандартов, 1985.

55. Андреенков Е. С. К вопросу оценки потерь активной мощности от высших гармоник тока в трансформаторах напряжения [Текст] / Е. С. Андреенков, А. И. Артемов // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (МНПК «ЛЭРЭП-9-2015») сборник научных трудов по

материалам IX международной научно-практической конференции. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2015. – С. 268-273.

56. Андреенков Е. С. Оценка погрешностей трансформаторов напряжения при несинусоидальной нагрузке [Текст] / Е. С. Андреенков, А. И. Артемов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – №1. – С. 97–103.

57. Научно-производственное предприятие Марс-Энерго. Официальный сайт. URL: http://www.mars-energo.ru/home/pribory-kontrolya-kachestva-i-ucheta-elektroenergii/energomonitor-3-3t1.html (дата обращения: 29.03.2016).

58. Андреенков Е. С. Методика оценки погрешностей трансформаторов напряжения в распределительных сетях 6-35 кВ [Текст] / Е. С. Андреенков, А. И. Артемов // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (МНПК «ЛЭРЭП-9-2015») сборник научных трудов по материалам IX международной научно-практической конференции. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2015. – С. 262-267.

59. Андреенков Е. С. К вопросу оценки погрешностей измерения качества напряжения трансформаторами с нелинейной нагрузкой вторичной цепи [Текст] / Е. С. Андреенков, А. И. Артемов // Информационные технологии, энергетика и экономика. Сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. В 3-х томах. – Смоленск: Универсум, 2016. – С. 3-6.

60. Артемов А.И. и др. Компенсация погрешностей трансформаторов типа НАМИ в режиме однофазного короткого замыкания в сети [Текст]. – Отчет по НИР №01/05 от 28 декабря 2004 г. – Смоленск, 2005. – 33 с.

61. Операционные усилители и компараторы. [Текст] / Под ред. Граблевской Е.Е. – М.: Издательский дом "Додэка - XXI", 2001. – 560 с.

62. Хоровиц П. Искусство схемотехники: Пер. с англ. [Текст] / П. Хоровиц,
У. Хилл. – Изд. 2-е. – М.: Издательство БИНОМ, 2014. – 704 с.

63. Щербаков В.И. Электронные схемы на операционных усилителях [Текст] / В.И. Щербаков, Г.И. Грездов. - К.: Техніка, 1993. – 216 с.

64. Стародубцев Ю. Н. Силовые трансформаторы [Текст] / Ю. Н. Стародубцев // ГАММАМЕТ ИНФОРМ. – 1998. – №2.

65. Техническое обслуживание измерительных трансформаторов тока и напряжения: пособие [Текст] / Под ред. Алексеева Б. А. – М.: НЦ ЭНАС, 2001. – с. 96.

66. **МИ 3023-2006** ГСИ. Нормализация нагрузки вторичных цепей измерительных трансформаторов напряжения [Текст]. – М.: Стандартинформ. – 2006.

67. Раскулов Р. Ф. Трансформаторы напряжения 3-35 кВ. Метрологические функции первичны [Текст] / Р. Ф. Раскулов // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – №6 (42).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



Рисунок П1.1 - Форма нагрузочного тока ТН типа НТМИ-6 (І с.ш. 6 кВ) на ПС «Диффузион» 110/6кВ

Таблица П1.1 – Спектр гармоник тока на вводе вторичной цепи ТН типа НТМИ-6 (I с.ш. 6 кВ) на ПС «Диффузион» 110/6кВ

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>K</i> _{<i>i</i>(<i>k</i>)} , %	100,00	0,31	18,41	0,00	64,85	0,00	57,17	0,00	7,02	0,20	37,74	0,09	29,71
$\varphi_{2(k)}, {}^{o}$	-45,91	0,00	231,79	0,00	177,33	0,00	223,14	0,00	212,66	0,00	146,60	0,00	161,50

где k – номер гармоники, $\varphi_{2(k)}$ – фаза k-й гармоники.

127



Рисунок П1.2 - Форма нагрузочного тока ТН типа НАМИ-6 (І с.ш. 6 кВ) на ПС «Смоленск-2» 110/6кВ

Таблица П1.2 – Спектр гармоник тока на вводе вторичной цепи ТН типа НАМИ-6 (І с.ш. 6 кВ) на ПС «Смоленск-2» 110/6кВ

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$K_{i(k)}$, %	100,00	0,31	10,61	0,00	27,91	0,00	27,12	0,10	5,49	0,00	10,05	0,00	10,30
$\varphi_{2(k)}, ^{o}$	149,19	0,00	141,27	0,00	51,70	0,00	109,95	-34,45	97,93	0,00	63,71	0,00	58,83

где k – номер гармоники, $\varphi_{2(k)}$ – фаза k-й гармоники.



Рисунок П1.3 - Форма нагрузочного тока ТН типа НАМИ-6 (IV с.ш. 6 кВ) на ПС «Смоленск-2» 110/6кВ

Таблица П1.3 – Спектр гармоник тока на вводе вторичной цепи ТН типа НАМИ-6 (IV с.ш. 6 кВ) на ПС «Смоленск-2» 110/6кВ

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
K _{i(k)} , %	100,00	0,31	10,73	0,04	21,19	0,00	16,20	0,00	0,52	0,00	10,66	0,00	8,37
$\varphi_{2(k)}, {}^{o}$	143,80	0,00	114,26	0,00	61,43	0,00	92,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

где k – номер гармоники, $\varphi_{2(k)}$ – фаза k-й гармоники.



Рисунок П1.4 - Форма нагрузочного тока ТН типа НАМИ-6 (II с.ш. 6 кВ) на ПС «Южная» 110/35/6кВ

Таблица П1.4 – Спектр гармоник тока на вводе вторичной цепи ТН типа НАМИ-6 (II с.ш. 6 кВ) на ПС «Южная» 110/35/6кВ

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>K</i> _{<i>i</i>(<i>k</i>)} , %	100,00	2,31	3,72	0,03	21,70	0,00	23,53	0,00	5,67	0,00	9,87	0,00	11,28
$\varphi_{2(k)}, ^{o}$	160,44	112,92	-157,79	0,00	130,67	0,00	137,36	0,00	99,61	0,00	67,73	0,00	80,38

где k – номер гармоники, $\varphi_{2(k)}$ – фаза k-й гармоники.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

	со s ф=0,8 <i>L</i>								
I_2, A	U_2, \mathbf{B}	$\Delta U_2, \%$	U_2^*, B	$\Delta U_2^*, \%$					
0	100	0	100	0					
0,50	99,16	-0,84	100,14	0,14					
1,00	98,41	-1,59	100,17	0,17					
2,00	96,89	-3,11	100,24	0,24					
3,00	95,39	-4,61	100,25	0,25					
4,00	93,92	-6,08	99,85	-0,15					
5,00	92,47	-7,53	98,87	-1,13					

Таблица П2.1 – Значения напряжений на выходе вторичной обмотки экспериментального TH в зависимости от величины тока нагрузки *I*₂, A с cosφ = 0,8*L*

где I_2 – ток во вторичной цепи TH; U_2 , U_2^* – напряжения на выводах вторичной обмотки соответственно без компенсации погрешностей и с компенсацией погрешностей; ΔU_2 , ΔU_2^* – погрешности измерения напряжения соответственно без компенсации и с компенсацией.



Рисунок П2.1 - Зависимость погрешности экспериментального TH с компенсацией и без компенсации погрешностей от величины тока нагрузки *I*₂, A с cosφ = 0,8*L*

	со s ф=0,6 <i>L</i>									
I_2 , A	U_2, B	$\Delta U_2, \%$	U_2^*, B	ΔU_2^* , %						
0	100	0	100	0						
0,50	99,16	-0,84	100,13	0,13						
1,00	98,42	-1,58	100,15	0,15						
2,00	96,93	-3,07	100,18	0,18						
3,00	95,45	-4,55	100,17	0,17						
4,00	94,02	-5,98	99,66	-0,34						
5,00	92,58	-7,42	98,70	-1,3						

Таблица П2.2 – Значения напряжений на выходе вторичной обмотки экспериментального TH в зависимости от величины тока нагрузки *I*₂, A с cosφ = 0,6*L*

где I_2 – ток во вторичной цепи ТН; U_2 , U_2^* – напряжения на выводах вторичной обмотки соответственно без компенсации погрешностей и с компенсацией погрешностей; ΔU_2 , ΔU_2^* – погрешности измерения напряжения соответственно без компенсации и с компенсацией.



Рисунок П2.2 - Зависимость погрешности экспериментального TH с компенсацией и без компенсации погрешностей от величины тока нагрузки *I*₂, A с cosφ = 0,6*L*

	сояф=0,8 <i>С</i>									
I_2, A	U_2, \mathbf{B}	$\Delta U_2, \%$	U_2^*, B	$\Delta U_2^*, \%$						
0	100	0	100	0						
0,50	99,78	-0,22	100,16	0,16						
1,00	99,65	-0,35	100,21	0,21						
2,00	99,41	-0,59	100,30	0,3						
3,00	99,25	-0,75	100,40	0,4						
4,00	98,99	-1,01	100,43	0,43						
5,00	98,76	-1,24	100,34	0,34						

Таблица П2.3 – Значения напряжений на выходе вторичной обмотки экспериментального TH в зависимости от величины тока нагрузки *I*₂, A с cosφ = 0,8*C*

где I_2 – ток во вторичной цепи ТН; U_2 , U_2^* – напряжения на выводах вторичной обмотки соответственно без компенсации погрешностей и с компенсацией погрешностей; ΔU_2 , ΔU_2^* – погрешности измерения напряжения соответственно без компенсации и с компенсацией.



Рисунок П2.3 - Зависимость погрешности экспериментального TH с компенсацией и без компенсации погрешностей от величины тока нагрузки *I*₂, A с cosφ = 0,8*C*

	сояф=0,6 <i>С</i>									
I_2, A	U_2, \mathbf{B}	$\Delta U_2, \%$	U_2^*, \mathbf{B}	$\Delta U_2^*, \%$						
0	100	0	100	0						
0,50	99,99	-0,01	100,15	0,15						
1,00	100,07	0,07	100,19	0,19						
2,00	100,27	0,27	100,27	0,27						
3,00	100,48	0,48	100,40	0,4						
4,00	100,70	0,7	100,48	0,48						
5,00	100,91	0,91	100,52	0,52						

Таблица П2.4 – Значения напряжений на выходе вторичной обмотки экспериментального TH в зависимости от величины тока нагрузки *I*₂, A с cosφ = 0,6*C*

где I_2 – ток во вторичной цепи TH; U_2 , U_2^* – напряжения на выводах вторичной обмотки соответственно без компенсации погрешностей и с компенсацией погрешностей; ΔU_2 , ΔU_2^* – погрешности измерения напряжения соответственно без компенсации и с компенсацией.



Рисунок П2.4 - Зависимость погрешности экспериментального TH с компенсацией и без компенсации погрешностей от величины тока нагрузки *I*₂, A с cosφ = 0,6*C*