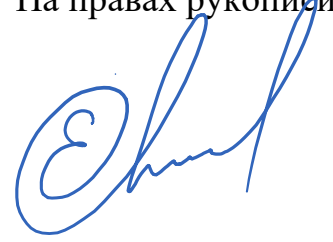


На правах рукописи



Андреенков Евгений Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ
НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-35 кВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Смоленск – 2016 г.

Работа выполнена в филиале федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске (филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент Артемов Александр Иванович

Официальные оппоненты:

Шклярский Ярослав Элиевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», заведующий кафедрой общей электротехники

Лебедев Владимир Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», заведующий кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами

Ведущая организация

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск)

Защита состоится «22» сентября 2016 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, факс (3842) 36-16-87, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте <http://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/soresearchers/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Семькина Ирина Юрьевна

ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 (ТН) эксплуатируются за пределами допустимого ГОСТом диапазона изменений их номинальных параметров, что приводит к увеличению их погрешностей и, как следствие, искажению показаний счетчиков.

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

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

В настоящее время задача компенсации погрешностей ТН рассматривается локально для определенных типов ТН и при определенных видах нагрузки (симметрирование нагрузки ТН, витковая коррекция при изготовлении, емкостная компенсация недоучета электроэнергии). 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.

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. Vaccigalupi 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, погрешности ТН при нелинейной нагрузке, компенсация погрешностей электромагнитных ТН.

Цель работы – повышение точности учета электроэнергии и измерения качества напряжения в распределительных сетях 6-35 кВ при автоматической компенсации погрешностей 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, с линейной и нелинейной нагрузкой во вторичных цепях.

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

4. Представить алгоритм компенсации погрешностей ТН, в том числе многообмоточных, позволяющий автоматически компенсировать 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 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).

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 ТН, отличающийся от известных тем, что не требует включения дополнительных устройств в разрыв высоковольтной цепи первичной обмотки ТН и позволяет обеспечить автоматическую компенсацию при изменении вторичной нагрузки ТН 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 использовании 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 с нелинейной нагрузкой, в том числе ТН, используемых для 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.

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 испытаниями на подстанциях филиала ПАО «МРСК Центра» - «Смоленскэнерго».

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

2. 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 научно-практической 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, указана научная новизна и практическая значимость результатов исследований. Представлена структура и объем диссертационной работы.

В первой главе приведены общие сведения о ТН, краткая характеристика конструкций ТН, а также требования, предъявляемые к ним согласно ГОСТ 1983-2001. Приводится характеристика нагрузок их вторичных цепей в современных условиях эксплуатации. На основании анализа научных публикаций рассматривается проблема оценки метрологических характеристик ТН при наличии воздействующих факторов, в том числе при использовании ТН для оценки качества электроэнергии.

На основании литературных источников рассмотрена проблема компенсации погрешностей и способов её реализации в отечественной и зарубежной практике.

В подавляющем большинстве случаев для компенсации погрешностей используются:

- витковая коррекция, которая применяется при изготовлении ТН только с высоким классом точности (0,2; 0,5);
- емкостная коррекция, описанная в работах А. С. Малого, которая используется для симметрирования нагрузки и компенсации недоучета электроэнергии за счет подключения во вторичную цепь ТН конденсаторов;
- компенсация с использованием вольтодобавочных трансформаторов, принцип которой описывается в работах А. И. Артемова;
- компенсация с использованием электронных устройств, которая получила широкое распространение в работах зарубежных авторов.

Указанные устройства позволяют эффективно компенсировать погрешности ТН только при использовании его для питания цепей учета электроэнергии при фиксированном количестве электросчетчиков и коэффициенте мощности нагрузки.

В частности, вольтодобавочные трансформаторы эффективно компенсируют погрешность только в случаях формирования вольтодобавки, равной фактической амплитуде падения напряжения в обмотках трансформатора и его фазовому сдвигу при определенной нагрузке, что влечет за собой необходимость рассчитывать и вручную настраивать блок вольтодобавочных трансформаторов при каждом существенном изменении нагрузки ТН.

Электронная коррекция погрешностей, предлагаемая в зарубежной практике, осуществляется через измерение токов в первичной и вторичной обмотках и с рядом условий, при которых появляются неточности компенсации. Электронные устройства включают в разрыв цепей первичной и вторичной обмоток, поэтому их применение возможно только в специальных маломощных ТН. Кроме того, такое включение приводит к общему снижению надежности ТН. Включение электронных устройств в первичную обмотку также создает ограничения по величине первичного напряжения.

В завершение первой главы делается вывод о том, что в рассмотренных работах предшественников не рассматриваются вопросы возникновения погрешностей ТН при нелинейной нагрузке и влияние их на результаты оценки качества электроэнергии. Не разработано устройство компенсации погрешностей, которое было бы пригодно для использования в реальных условиях применения стандартных ТН и при любом характере нагрузок.

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

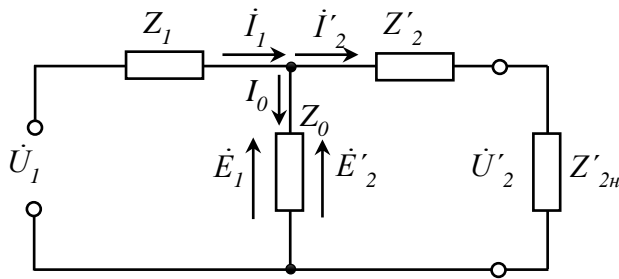


Рисунок 1 – Эквивалентная электрическая схема двухобмоточного трансформатора напряжения

Анализ возникновения погрешностей ТН проведен на простейшем двухобмоточном трансформаторе, схема замещения которого приведена на рисунке 1.

На основании проведенного анализа режима холостого хода конструкций и материалов магнитопроводов современных ТН установлено, что намагничивающая мощность и потери в стали практически пропорциональны квадрату индукции в магнитопроводе. Если представить амплитудную погрешность ТН в относительных единицах, то выражение для нее можно записать в виде:

$$\Delta U_x^* = \frac{\Delta U_x}{U_1} = -\frac{1}{U_1^2} (R_1 \Sigma P + X_1 \Sigma Q).$$

Измерениями погрешностей ТН типа ЗНОЛ.06-10 класса 0,5 при изменении U_1 в диапазоне от $0,05U_n$ до $1,9U_n$ подтверждено, что погрешности холостого хода ТН не изменяются при изменении подведенного напряжения, так как индукция прямо пропорциональна напряжению. Так как угловая погрешность определяется в основном мощностью потерь в магнитопроводе, то при холостом ходе она мала, так как $Q_x \gg P_x$ и не изменяется при изменении напряжения. Тогда относительные погрешности холостого хода ТН можно компенсировать витковой коррекцией при изготовлении, и дополнительная их компенсация в ходе эксплуатации не требуется.

При включении нагрузки $Z'_{2н}$ во вторичную цепь (см. рисунок 1) в образовавшейся замкнутой цепи появляется вторичный нагрузочный ток I'_2 , а в первичной обмотке появляется нагрузочный ток $I_1 = I'_2/k_T$. Нагрузочные токи I_1 и I'_2 , проходя по обмоткам ТН, вызывают в них падения напряжения.

Если ввести понятие полного сопротивления ТН $Z_m = R_m + jX_m$, то суммарное падение напряжения от нагрузки можно представить в следующем виде:

$$\Delta \dot{U}_n = \dot{I}_2 Z_m = \dot{I}_2 (R_m + jX_m) = \dot{U}_k.$$

При I'_2 , равном номинальному, $\Delta \dot{U}_n$ представляет собой напряжение короткого замыкания U_k ТН.

Анализ погрешностей ТН от нагрузки можно проводить без учета погрешностей холостого хода при наличии их витковой коррекции. Векторная диаграмма этого режима ТН представлена на рисунке 2.

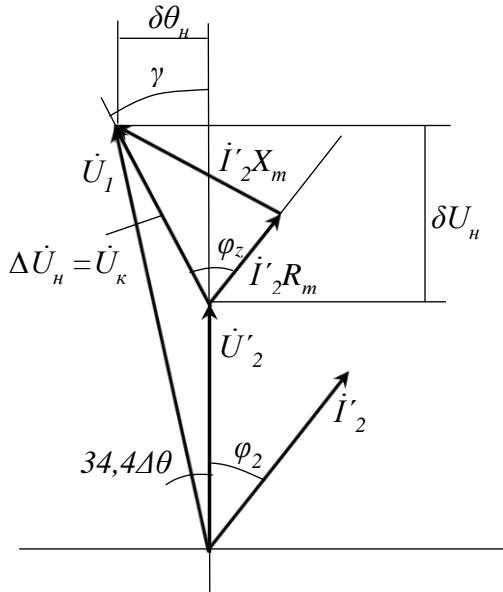


Рисунок 2 – Векторная диаграмма ТН для режима работы с нагрузкой

Из векторной диаграммы на рисунке 2, погрешности ТН от нагрузки представляются в следующей форме:

$$\delta U_n = -|\Delta \dot{U}_n| \cos(\varphi_2 - \varphi_z) = -|\Delta \dot{U}_n| \cos \gamma, \quad (1)$$

$$\delta \theta_n = 34,4 \cdot |\Delta \dot{U}_n| \sin(\varphi_2 - \varphi_z) = 34,4 \cdot |\Delta \dot{U}_n| \sin \gamma. \quad (2)$$

где δU_n – амплитудная погрешность; $\delta \theta_n$ – угловая погрешность.

Как видно из (1), (2), изменение погрешностей ТН от нагрузки I_2' носит линейный характер. При $|\Delta \dot{U}_n| = U_k$, уравнения (1) и (2) записываются в следующем виде:

$$\delta U_n = -U_k \beta \cos \gamma, \quad (3)$$

$$\delta \theta_n = 34,4 U_k \beta \sin \gamma, \quad (4)$$

где $\beta = I_2/I_{2n}$ – степень загрузки вторичной цепи ТН.

Напряжение короткого замыкания обычно представляют в % от номинального напряжения, тогда погрешности напряжения ТН в % получаются при подстановке в (3) U_k в %, а угловая погрешность, выраженная в минутах, получается при умножении $\delta \theta_n$ на коэффициент 34,4 переводящий о.е. в минуты.

Расчет погрешностей ТН при наличии параметров ТН: U_k % и γ , выполнен для ТН типа ЗНОЛ.06-10 при следующих исходных данных: $U_k = 0,65\%$ (при $S_{ном} = 50\text{ВА}$); $\varphi_z = 18^\circ$. По расчетным данным построены зависимости амплитудной и угловой погрешностей этого ТН от нагрузки с учетом компенсации погрешностей холостого хода витковой коррекцией, которые приведены на рисунке 3. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

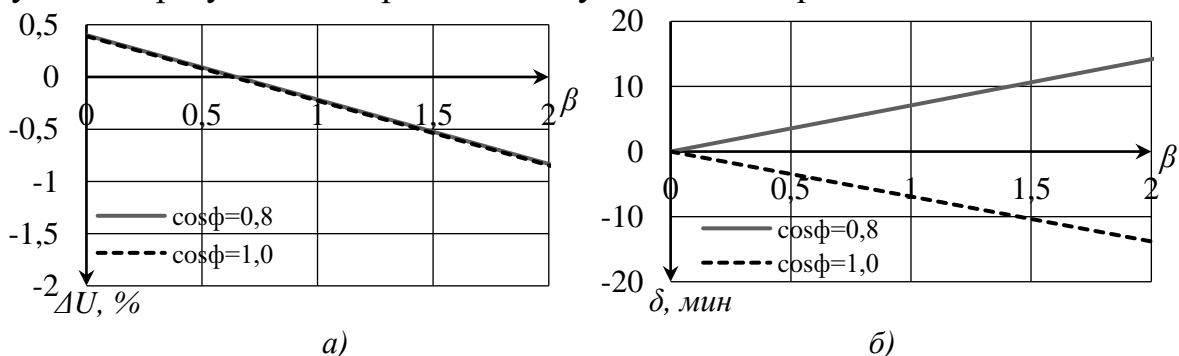


Рисунок 3 – Зависимость погрешностей напряжения (а) и угловой (б) ТН ЗНОЛ.06-10 от степени загрузки β

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_K) в производственных условиях.

4. Исследовано влияние на погрешности ТН характера нагрузки (емкостной, резистивный, индуктивный) и величины $\cos\varphi$ 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%.

Третья глава посвящена анализу нагрузок вторичных цепей ТН и оценке погрешностей трёхфазных ТН от нелинейной нагрузки.

Согласно проведенному анализу, нагрузка измерительных трансформаторов напряжения (ТН) 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 элементы, которые являются нелинейными 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 электронного счетчика типа Меркурий 230 AR-03 и на вводе вторичной цепи ТН типа НАМИ-10, установленного на одной из подстанций ПАО «МРСК Центра» – «Смоленскэнерго». Результаты измерений представлены на рисунке 4.

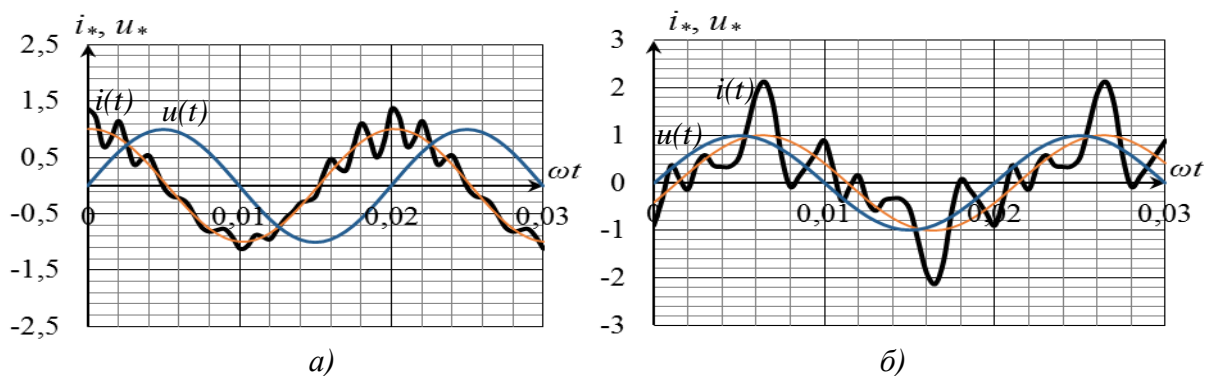


Рисунок 4 – а) Форма тока и напряжения на вводе счетчика типа Меркурий 230AR-03; б) форма нагрузочного тока ТН на ПС 110/35/6кВ ПАО «МРСК Центра» - «Смоленскэнерго»

Для исследования процессов возникновения погрешностей в системе с несинусоидальным током проведены исследования на схеме экспериментальной цепи ТН (рисунок 5, а) с нелинейной нагрузкой, которая создает ток несинусоидальной формы, представленной на рисунке 5, б.

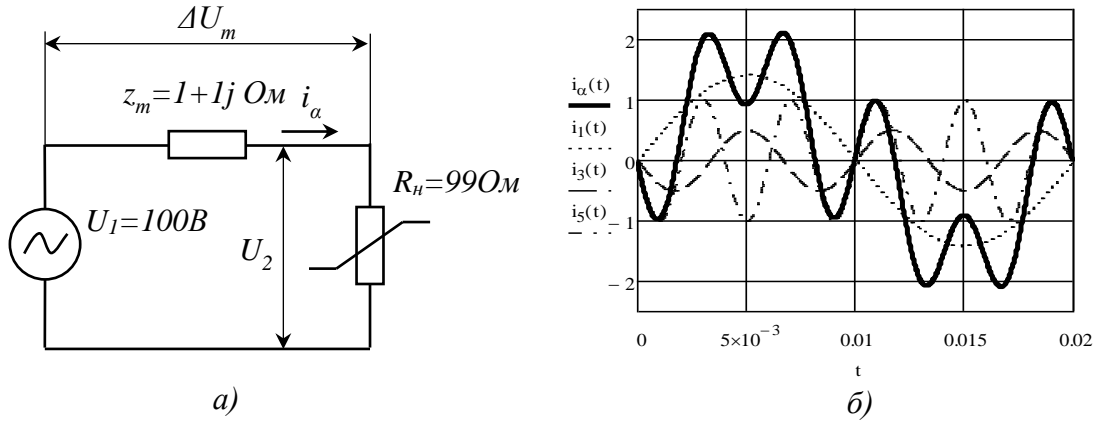


Рисунок 5 – Схема эксперимента (а), форма тока и напряжения (б)

Оценку погрешностей ТН при наличии высших гармоник предлагается производить через разность действующих значений измеряемого напряжения U_1 и действующего значения напряжения U_2 вторичной обмотки (на выходе ТН):

$$\Delta U_m = U_2 - U_1.$$

Для получения напряжения \dot{U}_2 используется принцип суперпозиции, для чего необходимо определить падения напряжения в сопротивлении трансформатора $\Delta \dot{U}_{m(k)}$ и напряжения \dot{U}_2 для каждой гармоники в отдельности, т.е.:

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

$$\|\dot{U}_{2(k)}\| = \|\dot{U}_1\| - \|\Delta \dot{U}_{m(k)}\|.$$

Углы сдвига гармоник напряжения \dot{U}_2 по отношению к напряжению \dot{U}_1 определяются как:

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

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

$$u_2(t) = \sum_{i=1}^n |\dot{U}_{2(k)}| \sin(k\omega t + \varphi_{U_{2(k)}}). \quad (5)$$

В этом случае действующее значение напряжения U_2 определяется выражением:

$$U_2 = \sqrt{\sum_{k=1}^n |\dot{U}_{2(k)}|^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^n |\dot{U}_{1(k)} - \Delta \dot{U}_{m(k)}|^2}. \quad (6)$$

Если выделить составляющую первой гармоники и учесть отсутствие высших гармоник в составе \dot{U}_1 , то выражение (6) можно представить в виде:

$$U_2 = \sqrt{|\dot{U}_{1(1)} - \Delta \dot{U}_{m(1)}|^2 + \sum_{k=2}^n |\Delta \dot{U}_{m(k)}|^2} = \sqrt{|\dot{U}_{2(1)}|^2 + \sum_{k=2}^n |\Delta \dot{U}_{m(k)}|^2}. \quad (7)$$

Из анализа выражения (7) видно, что действующее значение несинусоидального напряжения U_2 всегда больше действующего значения $U_{2(1)}$ для первой гармоники:

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

Напряжения $u_1(t)$ и $u_2(t)$ могут не совпадать по фазе (см. рисунок 6, б для рассматриваемого примера), тогда этот угловой сдвиг будет представлять собой угловую погрешность ТН. Этот угловой сдвиг определяется решением уравнения (5) относительно t , если приравнять его правую часть к нулю:

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

Для перевода полученного значения временного сдвига t_0 в градусы используется выражение:

$$\Delta\theta_{на} = \frac{t_0 \cdot 360}{T}.$$

Для проверки предложенной методики оценки погрешностей ТН от нелинейной нагрузки предложена модель рассматриваемой схемы, приведенная на рисунке 6, а.

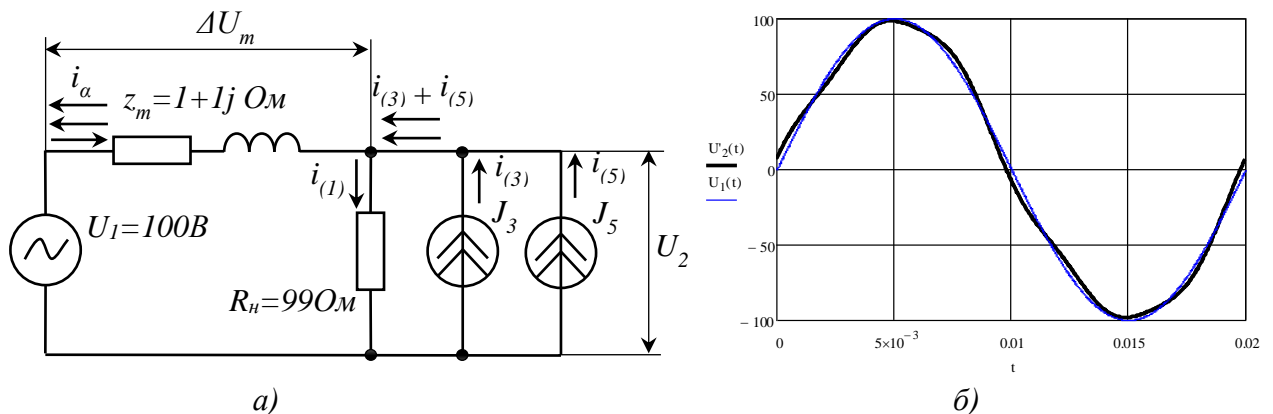


Рисунок 6 – Схема эксперимента (а), форма напряжения $u_2(t)$ при работе ТН на нелинейную нагрузку (б)

В схеме синусоидальное напряжение \dot{U}_1 подведено к нагрузке ТН с активным сопротивлением $R_n = 99 \text{ Ом}$. Сопротивление эквивалентного трансформатора учитывается в схеме комплексным сопротивлением $z_m = 1 + 1j \text{ Ом}$. 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 ТН, которые полностью совпали с результатами измерений на экспериментальной цепи.

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 его

нагрузки. Поэтому в регламентированную 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, не 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 U_2 по методике, представленной выше.

Выводы по главе:

1. 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.

2. 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.

3. 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 гармонике.

4. 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 предложенной методике.

5. 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.

Четвертая глава посвящена исследованию и разработке устройств автоматической компенсации погрешностей измерительных ТН.

На основании полученных уравнений вычисления погрешностей ТН в режиме холостого хода и при нагрузке 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 ТН, а потери напряжения от нагрузки компенсируются соответствующей вольтодобавкой. Поэтому дальнейшее рассмотрение вопросов компенсации сосредоточено на компенсации погрешностей от нагрузки вторичной цепи ТН.

Компенсация погрешностей ТН предусматривает обеспечение условия равенства приведенного напряжения на нагрузке первичному (измеряемому) напряжению \dot{U}_1 , т.е.:

$$\dot{U}'_{2н} = \dot{U}'_1.$$

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

$$\begin{aligned}\dot{U}'_1 &= \dot{U}'_{2н} = \dot{U}_2 + \Delta\dot{U}_н, \\ \Delta\dot{U}_н &= \dot{I}_2 Z_m = \dot{I}_2 (R_m + jX_m).\end{aligned}$$

Разработан вариант, предусматривающий формирование добавочного напряжения путем сравнения в измерительном операционном усилителе опорного напряжения (равного измеряемому напряжению) и фактического напряжения на нагрузке. Опорное напряжение, равное неизвестному первичному напряжению \dot{U}_1 формируется путем суммирования напряжения холостого хода дополнительной обмотки $\dot{U}_{3х}$ с падением напряжения в первичной обмотке ТН от нагрузочного тока \dot{I}_2 основной обмотки $\Delta\dot{U}_{н1}$:

$$\begin{aligned}\dot{U}_0 = \dot{U}'_1 &= \dot{U}_{3х} + \Delta\dot{U}_{н1}, \\ \Delta\dot{U}_{н1} &= \dot{I}_2 Z_1 = \dot{I}_2 (R_1 + jX_1),\end{aligned}$$

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

Структурная схема, реализующая алгоритм, приведена на рисунке 7.

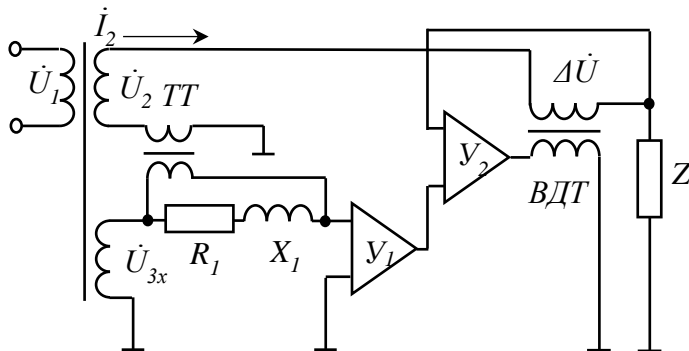


Рисунок 7 – Структурная схема ТН с формированием вольтодобавки сравнением измеряемого напряжения и фактического на нагрузке

Напряжение, равное падению напряжения в первичной обмотке ТН $\Delta\dot{U}_{н1}$ в данной схеме реализуется вторичной цепью ТТ, включенного в основную вторичную обмотку. В усилителе $Y1$ два сигнала $\dot{U}_{3х}$ и $\Delta\dot{U}_{н1}$ суммируются, образуя напряжение равное приведенному измеряемому напряжению \dot{U}'_1 . На усилителе $Y2$ формируется разность напряжения \dot{U}'_1 и фактического напряжения на

нагрузке $\dot{U}'_{2н}$, которая и является необходимой добавкой ЭДС $\Delta\dot{U}_н$. Напряжение вольтодобавки усиливается и передается через ВДТ во вторичную цепь, выполняя условие $\dot{U}'_{2н} = \dot{U}'_1$.

Приведенная на рисунке 7 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 ТТ, которыми формируются падения напряжения в ТН. Сформированные напряжения суммируются с напряжением \dot{U}_2 компенсируемой обмотки и формируют опорное напряжение, равное \dot{U}'_1 .

Согласно выше описанному алгоритму была разработана принципиальная схема и построен образец устройства автоматической компенсации погрешностей ТН. Принципиальная схема устройства приведена на рисунке 8. Данное устройство

было успешно испытано в лабораторных условиях для различных вариантов величины и характера нагрузки.

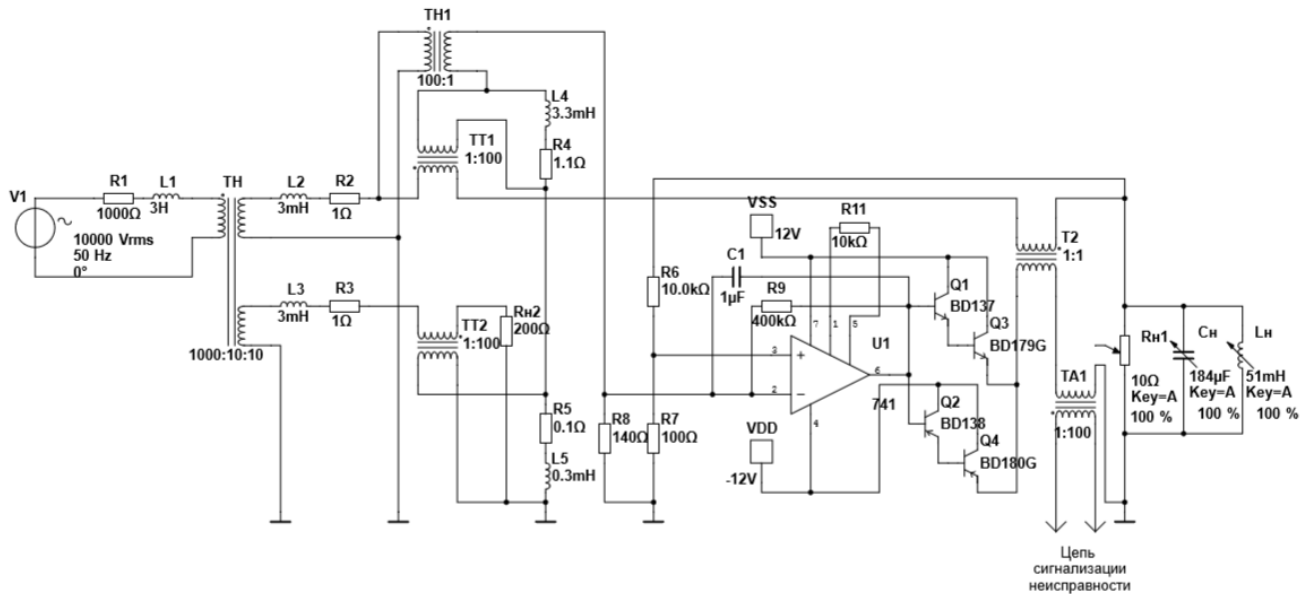


Рисунок 8 – Принципиальная схема устройства автоматической компенсации погрешностей ТН

Отличительной особенностью предлагаемой схемы является формирования напряжения компенсации на вольтодобавочном трансформаторе. Такое решение обеспечивает решение вопроса надежной работы компенсированного ТН. В предлагаемой 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.

Структурную схему, представленную на рисунке 7, 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 9.

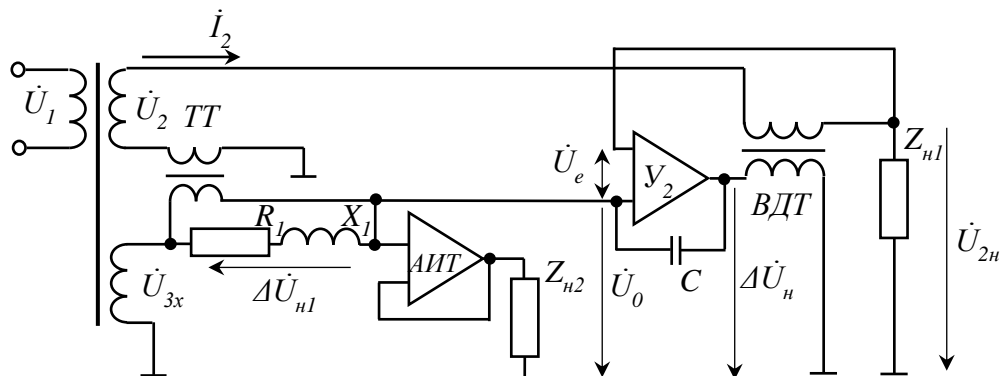


Рисунок 9 – Структурная схема ТН с формированием опорного напряжения путем разгрузки дополнительной обмотки

Так как АИТ имеет большое входное сопротивление, режим работы дополнительной обмотки близок к режиму холостого хода. Мощность в нагрузке $Z_{н2}$ обеспечивается за счет цепей оперативного питания. АИТ можно так же использовать и для разгрузки основной обмотки ТН.

Была разработана принципиальная схема АИТ для устранения погрешностей ТН и построен макетный образец устройства. Разработанная схема приведена на рисунке 10.

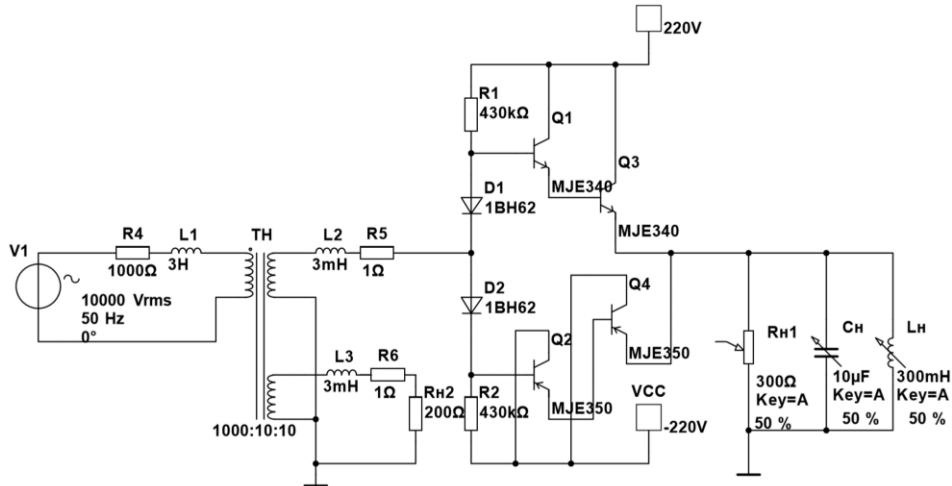


Рисунок 10 – Принципиальная схема активного измерительного трансформатора

Выводы по главе:

1. Разработаны различные варианты схемных решений автоматической компенсации погрешностей и проведено их компьютерное моделирование. 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.

Основные результаты выполненных исследований:

1. Предложена методика, позволяющая 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 ТН, обеспечивающего работу ТН с минимальной нагрузкой в наивысшем классе точности без необходимости замены и модернизации самих ТН.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

2. Андреенков Е.С. Разработка устройства компенсации погрешностей измерительных трансформаторов напряжения // Вестник ИГЭУ. – 2016. – №3.

3. Андреенков Е.С., Шунаев С.А. Система диагностики подвесной изоляции воздушных линий электропередачи напряжением 110-750 кВ // Научное обозрение. – 2015. – №8. – С. 105-110.

4. Андреенков Е.С., Артемов А.И. К вопросу оценки потерь активной мощности от высших гармоник тока в трансформаторах напряжения // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (МНПК «ЛЭРЭП-9-2015») сб. научных трудов по материалам IX межд. научно-практической конференции. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2015. – С. 268-273.

5. Андреенков Е.С., Артемов А.И. Методика оценки погрешностей трансформаторов напряжения в распределительных сетях 6-35 кВ // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (МНПК «ЛЭРЭП-9-

2015») сб. научных трудов по материалам IX межд. научно-практической конференции. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2015. – С. 262-267.

6. Андреенков Е.С., Артемов А.И. Трансформатор напряжения как нелинейный элемент // «Энергетика, информатика, инновации-2015» Сб. трудов Международной научно-технической конференции. В 2 томах. Т1. – Смоленск: Универсум, 2015. – С. 6-11.

7. Андреенков Е.С., Артемов А.И. Уточнение погрешностей трехобмоточных трансформаторов напряжения // «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.

8. Андреенков Е.С., Артемов А.И. Расчет фактических погрешностей трансформаторов напряжения в условиях эксплуатации // «Энергетика, информатика, инновации-2015» Сб. трудов Международной научно-технической конференции. В 2 томах. Т1. – Смоленск: Универсум, 2015. – С. 3-6.

9. Андреенков Е.С., Артемов А.И. Исследование погрешностей измерительных трансформаторов напряжения при нелинейной нагрузке вторичной цепи // «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» Сб. трудов II Всероссийской научно-практической конференции. – Кемерово, 2015.

10. Артемов А.И., Андреенков Е.С. Анализ способов компенсации погрешностей трансформаторов напряжения // «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» Сб. трудов II Всероссийской научно-практической конференции. – Кемерово, 2015.

11. Андреенков Е.С. Компенсация погрешностей трансформаторов напряжения // Электроэнергетика. Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2016. – С. 20-21.

12. Андреенков Е.С. Оценка класса точности измерительных трансформаторов напряжения при нелинейной нагрузке вторичной цепи // Электроэнергетика. Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2016. – С. 145-147.

13. Андреенков Е.С., Артемов А.И. К вопросу оценки погрешностей измерения качества напряжения трансформаторами с нелинейной нагрузкой вторичной цепи // «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.