

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 621.314.222.8

Лымарь  
Олег Владимирович

**ОЦЕНКА И УЧЕТ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.14.02 – «Электростанции  
и электроэнергетические системы»

Минск, 2013

Работа выполнена в учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»

Научный руководитель: **Широков Олег Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»

Официальные оппоненты: **Забелло Евгений Петрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий» Белорусского государственного аграрного технического университета (г. Минск);

**Могила Владимир Степанович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрический подвижной состав» учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта» (г. Гомель)

Оппонирующая организация: Научно-исследовательское и проектно-изыскательское республиканское унитарное предприятие «Белэнергосетьпроект» (г. Минск)

Защита состоится 15 ноября 2013 года в 10<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.02 в Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах просим высылать на адрес университета и предварительно отправлять по факсу (8-017) 292-91-37 (для стран СНГ: (8-10-375-17) 292-91-37) на имя председателя совета по защите диссертаций Ф.А. Романюка.

Автореферат разослан 04 октября 2013 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций

доктор технических наук, профессор \_\_\_\_\_ Сергей И.И.

© Лымарь О.В., 2013

© Белорусский национальный  
технический университет, 2013

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Несинусоидальность напряжения неблагоприятно влияет на энергетические показатели работы силового электрооборудования, сокращает срок его службы, снижает надежность функционирования электрических сетей и приводит к сбоям в работе систем релейной защиты и автоматики (РЗА), телемеханики и связи. Соблюдение установленных в ГОСТ 13109-97 требований к содержанию гармонических составляющих напряжения позволяет исключить или значительно уменьшить указанное отрицательное воздействие. При этом одним из основных условий поддержания качества электроэнергии (КЭ) в рамках нормированных значений является обеспечение достоверности результатов контроля и анализа КЭ.

Проблема достоверности результатов контроля и анализа КЭ в части несинусоидальности напряжения наиболее актуальна для электрических сетей выше 1 кВ, где, кроме самих средств контроля КЭ, необходимо применять измерительные масштабные преобразователи напряжения, как правило, трансформаторы напряжения (ТН), частотные характеристики которых не нормируются. В частности, недостаточно исследованы амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и гармонические искажения напряжения, возникающие на выходе ТН из-за нелинейности кривой намагничивания магнитопровода, необходимые при контроле показателей несинусоидальности напряжения. В связи с широким применением методик выявления источников несинусоидальности напряжения, базирующихся на анализе потоков мощности искажения или определении угла между искажающим током и напряжением в узле, становится актуальной проблема нормирования и исследования фазо-частотных характеристик (ФЧХ) ТН, влияющих на результаты измерений фаз  $n$ -ых гармонических составляющих напряжения.

Одним из путей решения рассматриваемой проблемы является организация периодического контроля частотных характеристик находящихся в эксплуатации ТН и их учета при контроле и анализе КЭ. Исследования в этой области уже ведутся в крупнейших научных организациях, в частности, России (УГТУ-УПИ, ПГУ), Германии (TU Dresden), Норвегии (SINTEF) и Польши (GUT). Однако до настоящего времени отсутствовали методы и средства, позволяющие эффективно решить такую задачу.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.** Работа выполнялась в рамках научно-исследовательской работы кафедры «Электроснабжение» Учреждения образования «Гомельский государст-

венный технический университет имени П.О. Сухого» «Оценка влияния энергосистемы на качество электроснабжения НПС РУП «Гомельтранснефть «Дружба».

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований в области обеспечения электромагнитной совместимости электрических сетей систем электроснабжения общего назначения и электрических сетей потребителей электрической энергии.

**Цель и задачи исследования.** *Целью исследований* являлось повышение достоверности результатов контроля показателей несинусоидальности напряжения в электрических сетях выше 1 кВ.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- проанализировать существующие нормативные требования к частотным характеристикам трансформаторов напряжения, а также выполнить аналитический обзор и сравнительный анализ известных способов определения частотных характеристик трансформаторов напряжения, применяемых при контроле и анализе качества электроэнергии;
- установить требования к методам и средствам автоматизированного контроля частотных характеристик трансформаторов напряжения, применяемых при контроле и анализе качества электроэнергии;
- разработать метод и автоматизированную систему контроля частотных характеристик трансформаторов напряжения, применяемых при контроле и анализе качества электроэнергии;
- разработать методику учета частотных характеристик трансформаторов напряжения при контроле и анализе качества электроэнергии;
- технически реализовать опытный образец автоматизированной системы контроля частотных характеристик трансформаторов напряжения, применяемых при контроле и анализе качества электроэнергии;
- произвести экспериментальную апробацию опытного образца разработанной автоматизированной системы контроля частотных характеристик трансформаторов напряжения на реальных объектах: исследовать частотные характеристики однофазных трансформаторов напряжения типа НОМ-6 и НОМ-10 при различных значениях испытательного напряжения и вариантах нагрузки.

*Объектом исследований* являлись трансформаторы напряжения в составе автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии. *Предмет исследования* – метод оценки и методика учета частотных характеристик трансформаторов напряжения при контроле и анализе качества электроэнергии.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Метод и средство контроля частотных характеристик трансформаторов напряжения, применяемых при контроле и анализе качества электроэнергии, отличающиеся автоматизацией измерений частотных характеристик и фактической нагрузки трансформаторов напряжения и автономной генерацией моно- или полигармонического испытательного напряжения с различным содержанием гармонических составляющих задаваемых амплитуд и фаз.

2. Впервые предложенная методика учета частотных характеристик трансформаторов напряжения при контроле и анализе качества электроэнергии, позволяющая повысить достоверность результатов контроля показателей несинусоидальности напряжения и точность измерений фаз гармонических составляющих напряжения в электрических сетях выше 1 кВ.

3. Экспериментальные доказательства эффективности разработанного метода контроля частотных характеристик трансформаторов напряжения и обоснование необходимости периодического контроля частотных характеристик трансформаторов напряжения на месте их эксплуатации и введения поправок в результаты контроля и анализа качества электроэнергии, полученные при апробации опытного образца автоматизированной системы контроля частотных характеристик трансформаторов напряжения.

**Личный вклад соискателя.** Соискателем разработаны метод оценки и методика учета частотных характеристик трансформаторов напряжения при контроле показателей несинусоидальности напряжения, создан опытный образец автоматизированной системы контроля частотных характеристик трансформаторов напряжения, выполнены экспериментальные и теоретические исследования, обработка полученных результатов и математическое моделирование. Постановка задач исследования, определение возможных путей их решения, анализ, интерпретация и обобщение полученных результатов, формулировка выводов и заключений выполнены соискателем совместно с научным руководителем.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты исследований, содержащиеся в диссертации, докладывались и обсуждались на Международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и магистрантов (Гомель, 2002 г.); III Международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и магистрантов (Гомель, 2003 г.); V Международной научно-технической конференции “Современные проблемы машиноведения” (Гомель, 2004 г.); III Международной научно-технической конференции “Аграрная энергетика в XXI-м столетии” (Минск, 2005 г.); VI Международной научно-технической конференции “Современные проблемы машиноведения” (Гомель, 2006 г.); VIII Международной научно-

технической конференции “Современные проблемы машиноведения” (Гомель, 2010 г.).

**Опубликованность результатов диссертации.** Результаты диссертации опубликованы в четырех статьях в научных журналах (1,5 авторских листа), трех статьях в материалах конференций, пяти тезисах докладов конференций, получено два патента Республики Беларусь на изобретение. Общее количество опубликованных материалов составляет 2,5 авторских листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 214 страниц, включая: 46 иллюстраций на 24 страницах; 5 таблиц на 2 страницах; библиографический список на 13 страницах (165 наименований источников, из которых 16 авторских); 4 приложения на 81 странице.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В первой главе** приведен аналитический обзор по рассматриваемой проблеме, определен предмет, обоснованы цель и задачи исследования.

Выявлено отсутствие в действующих на территории Республики Беларусь технических нормативных правовых актах (ТНПА) требований к частотным характеристикам ТН, используемым при контроле и анализе КЭ.

Показано, что существующие расчетно-экспериментальные методы определения частотных характеристик ТН обладают недостаточной точностью и могут применяться только для предварительной оценки частотных характеристик ТН на стадии их проектирования. Наиболее эффективными являются методы непосредственного измерения частотных характеристик ТН, причем из-за большого объема необходимых работ этот процесс должен быть максимально автоматизирован. Значительная трудоемкость является основным недостатком разработанных в Российской Федерации и Республике Польша методов измерений частотных характеристик ТН, что приводит к необходимости вывода ТН из эксплуатации на значительное время и увеличению общего числа средств, требуемых для их периодического диагностирования.

Систематизированы опубликованные данные по частотным характеристикам ТН различных типов, подтверждающие необходимость внесения соответствующих поправок в результаты контроля и анализа КЭ в электрических сетях выше 1 кВ.

На основании выполненного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** рассмотрены проблемы разработки метода и средства автоматизированного контроля частотных характеристик ТН. Для этого были установлены требования, которым они должны удовлетворять, и определены характеристики погрешности измерений частотных характеристик ТН.

Ввиду наличия между Республикой Беларусь и Российской Федерацией общего нормативно-технического поля в области КЭ, предложено за основу норм частотных характеристик ТН принять требования методических указаний РД 153-34.0-15.501-00. В них установлены требования к неравномерности АЧХ ТН (до 2 %) и регламентировано значение коэффициентов n-ых гармонических составляющих напряжения на выходе ТН при подаче на его вход синусоидального напряжения частотой 50 Гц (на уровне 0,02 %). Одновременно с указанными характеристиками необходимо установить норму в пределах нескольких электрических градусов для погрешности измерений фаз n-ых гармонических составляющих напряжения. В работе предложено ориентироваться на значение в 1 эл.град.

На практике соблюдение указанных норм может оказаться не всегда технически реализуемым и экономически оправданным. В этом случае полноценной заменой их соблюдению является учет реальных частотных характеристик, присущих отдельным типам или даже конкретным экземплярам ТН, при контроле и анализе КЭ. Данный подход позволяет в целом повысить точность измерений и сэкономить значительные средства на замене уже установленных ТН.

Обоснована необходимость контроля частотных характеристик ТН одновременно с периодической поверкой (калибровкой). Показано, что измерения частотных характеристик ТН, соответствующих ГОСТ 1983-2001, достаточно производить при таких же значениях испытательного напряжения, как и при поверке (калибровке): 80, 100 и 120 % от номинального напряжения ТН.

В соответствии с предложенным методом измерений, амплитудная и угловая погрешности ТН на высших гармониках (ВГ) определяются при полигармоническом испытательном напряжении, содержащем, как минимум, доминирующую гармонику промышленной (номинальной) частоты и одну ВГ, по формулам

$$\delta K_n = \frac{K_{U(n)НН} - K_{U(n)ВН}}{K_{U(n)ВН}} \cdot 100\%; \quad (1)$$

$$\Delta\varphi_n = \varphi_{n(НН)} - \varphi_{n(ВН)}, \quad (2)$$

где  $K_{U(n)НН}$  и  $K_{U(n)ВН}$  – коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения на стороне низкого и высокого напряжения ТН, %;

$\varphi_{n(НН)}$  и  $\varphi_{n(ВН)}$  – фаза n-ой гармонической составляющей напряжения на стороне низкого и высокого напряжения ТН, эл.град.

В этом случае амплитудная погрешность ТН определяется относительно значения напряжения доминирующей гармоники (50 Гц) и, соответственно, не учитывается погрешность ТН на промышленной частоте (при необходимости, по результатам поверки ТН, можно будет ввести соответствующие поправки).

Поверка ТН производится при синусоидальном испытательном напряжении номинальной частоты. Одновременно с ней, по формуле (3), определяются гармонические искажения напряжения, возникающие на выходе ТН при подаче на его вход синусоидального испытательного напряжения номинальной частоты и измеряется реальная нагрузка ТН.

$$K_{U(n)}^{rn} = K_{U(n)HN} - K_{U(n)BH} \cdot \quad (3)$$

В рамках диссертационного исследования термин “частотные характеристики ТН” является обобщающим для совокупности зависимостей амплитудной и угловой погрешности ТН от частоты приложенного напряжения, определяемых по формулам (1) и (2), и гармонических искажений напряжения, возникающих на выходе ТН при подаче на его вход синусоидального испытательного напряжения номинальной частоты, характеризуемых коэффициентами n-ой гармонической составляющей напряжения (3).

Установлено, что при указанных выше нормах к частотным характеристикам ТН погрешность их измерений должна удовлетворять следующим требованиям: абсолютная погрешность измерений  $\delta K_n$  – не более 0,5 %; абсолютная погрешность измерений  $\Delta \varphi_n$  (при установленной норме в 1 эл.град.) – не более 0,25 эл.град.; абсолютная погрешность измерений  $K_{U(n)}^{rn}$  – не более 0,005 %.

Средство контроля частотных характеристик ТН должно удовлетворять следующим требованиям: иметь небольшие массогабаритные характеристики; выполнять измерения за минимальное время; в испытательном напряжении должно быть минимальное содержание посторонних гармоник; процесс подготовки к измерениям и сами измерения должны отличаться предельной простотой, что снижает требования к квалификации оператора и сокращает вероятность выхода средства диагностирования из строя.

Разработанный метод контроля частотных характеристик ТН состоит в сличении частотных характеристик испытуемого ТН и эталонного делителя напряжения и подразумевает автономную генерацию моно- или полигармонического испытательного напряжения с различным содержанием гармоник задаваемых амплитуд и фаз. Функциональная схема автоматизированной системы контроля частотных характеристик ТН (далее по тексту – АСК), реализующей предлагаемый метод, представлена на рисунке 1 [2, 14].



пытательное напряжение снижается до нуля, например, по линейному закону, и дальнейшие измерения прекращаются. После каждого цикла измерений, перед началом следующего и по окончании измерений, испытательное напряжение снижается до нуля по определенному закону, например, линейному. Результаты измерений хранятся в энергонезависимой памяти БУ и могут быть выведены на дисплей или другое периферийное устройство (например, принтер). Описанное устройство (АСК) защищено двумя патентами Республики Беларусь [13, 14].

Установлены технические и метрологические требования к отдельным элементам и узлам разработанной АСК, а также разработаны варианты их возможной практической реализации. Например, показано, что в качестве блока управления рациональнее использовать современный персональный компьютер (ПК), что упрощает и удешевляет производство и эксплуатацию АСК.

Определены последовательность и содержание операций при подготовке и выполнении контроля частотных характеристик ТН. Разработан типовой алгоритм работы АСК и приведена его укрупненная схема. Благодаря модульности и замены аппаратной логики на программную, разработанная АСК легко масштабируется до трехфазного исполнения, что позволяет выполнять контроль частотных характеристик трехфазных ТН.

При превышении установленных требований к частотным характеристикам ТН, возникает необходимость введения соответствующих поправок в результаты измерений показателей несинусоидальности напряжения. Для этого может быть использована разработанная методика учета частотных характеристик ТН при контроле и анализе КЭ.

В первую очередь учитываются гармонические искажения напряжения, возникающие на выходе ТН при подаче на его вход синусоидального испытательного напряжения номинальной частоты по формуле

$$K'_{U(n)i} = \sqrt{\left(K_{U(n)i}^{\text{ИЗМ}}\right)^2 + \left(K_{U(n)}^{\text{ГИ}}\right)^2 - 2 \cdot K_{U(n)i}^{\text{ИЗМ}} \cdot K_{U(n)}^{\text{ГИ}} \cdot \cos(\varphi_{(n)i}^{\text{ИЗМ}} - \varphi_{(n)\text{ГИ}})}, \quad (4)$$

где  $K'_{U(n)i}$  – коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения с учтенными гармоническими искажениями на  $i$ -ом наблюдении, %;

$\varphi_{(n)\text{ГИ}}$  – фаза  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения, возникающей на выходе ТН при подаче на его вход синусоидального испытательного напряжения номинальной частоты, эл.град.;

$K_{U(n)i}^{\text{ИЗМ}}$ ,  $\varphi_{(n)i}^{\text{ИЗМ}}$  – результат  $i$ -го измерения коэффициента, %, и фазы, эл.град.,  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения (по прибору контроля КЭ).

При содержании накладываемой гармоники в испытательном напряжении 8 % и наличии гармонических искажений свыше 0,02 % относительная погрешность определения амплитудной погрешности ТН может превысить 0,25 %.

В этом случае целесообразно скорректировать результаты измерений амплитудной и угловой погрешности ТН для n-ой гармонической составляющей напряжения путем исключения из них гармонических искажений напряжения, возникающих на выходе ТН при подаче на его вход синусоидального испытательного напряжения номинальной частоты. Уточненные значения амплитудной и угловой погрешности ТН для n-ой гармонической составляющей напряжения определяются по формулам

$$\delta K_{U(n)} = \left[ \frac{\sqrt{K_{U(n)НН}^2 + (K_{U(n)}^{ГН})^2 - 2 \cdot K_{U(n)НН} \cdot K_{U(n)}^{ГН} \cdot \sqrt{\cos(\varphi_{(n)ГИ} - \varphi_{(n)НН})}}}{K_{U(n)ВН}} - 1 \right] \cdot 100\%;$$

$$\Delta\varphi_n = \varphi_{(n)НН} - \arcsin \left[ \frac{K_{U(n)}^{ГН} \cdot \sin(\varphi_{(n)ГИ} - \varphi_{(n)НН})}{\sqrt{K_{U(n)НН}^2 + (K_{U(n)}^{ГН})^2 - 2 \cdot K_{U(n)НН} \cdot K_{U(n)}^{ГН} \cdot \sqrt{\cos(\varphi_{(n)ГИ} - \varphi_{(n)НН})}}} \right] - \varphi_{(n)ВН}.$$

Фазы  $\varphi_{(n)ГИ}$ ,  $\varphi_{(n)и}^{ИЗМ}$  и  $\varphi_{(n)НН}$  должны быть однозначно определены относительно заданного базового значения фазы гармонической составляющей напряжения промышленной частоты (50 Гц).

После этого учитывается неравномерность АЧХ ТН по формуле

$$K_{U(n)i}^д = \frac{K_{U(n)i}'}{1 + \frac{\delta K_{U(n)}}{100}},$$

где  $K_{U(n)i}^д$  – действительное значение коэффициента n-ой гармонической составляющей напряжения на i-ом наблюдении, %.

Если гармонические искажения на выходе ТН не превышают установленную норму, то сразу учитывается неравномерность АЧХ ТН по формуле (6).

После нахождения действительных значений коэффициентов n-ой гармонической составляющей напряжения определяется коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения для i-го наблюдения.

Угловые погрешности ТН на ВГ учитываются по формуле

$$\varphi_{ni}^д = \varphi_{ni}^{ИЗМ} - \Delta\varphi_n,$$

где  $\varphi_{ni}^d$  – действительное значение фазы n-ой гармонической составляющей напряжения на i-ом наблюдении, эл.град.;

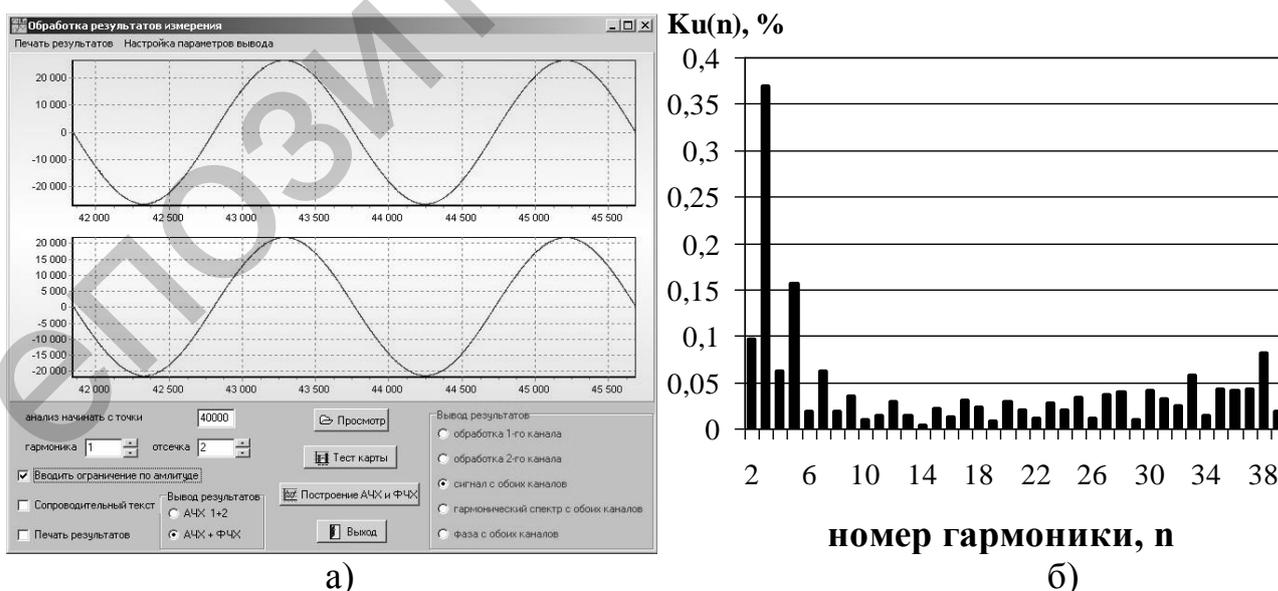
$\varphi_{ni}^{изм}$  – результат i-го наблюдения фазы n-ой гармонической составляющей напряжения (по прибору анализа КЭ), эл.град.

Приведенную методику учета частотных характеристик ТН при контроле и анализе КЭ целесообразно внедрить непосредственно в алгоритм работы приборов контроля и анализа КЭ.

**Третья глава** посвящена программно-аппаратной реализации прототипа АСК, предназначенного для исследований частотных характеристик ТН при испытательных напряжениях до 5,2 кВ. Выбраны электронные узлы и модули прототипа, проведен анализ их возможной схмотехнической и программно-аппаратной реализации.

Прототип выполнен на базе ПК с интегрированными ЦАП и АЦП. Технические характеристики преобразователей использованного аудио адаптера ПК полностью перекрывают требования, определенные во второй главе к ЦАП и АЦП, как по частоте дискретизации, так и по количеству разрядов. Эффективность ЦАП аудио адаптера была подтверждена на практике при измерении частотных характеристик низковольтных ТН [15].

Контроль частотных характеристик ТН производится под управлением разработанной специализированной программы “Harmonicas 3” и состоит из двух этапов. На первом этапе формируется архив измерений на жестком диске ПК в виде осциллограмм напряжений. На втором этапе производится обработка полученных данных (рисунок 2, а).



**Рисунок 2 – Окно обработки результатов измерений программы “Harmonicas 3” с осциллограммой сигнала синусоидального испытательного напряжения величиной 5,2 кВ частотой 50 Гц (вверху) (а) и гистограмма коэффициента  $K_{U(n)}$  данного сигнала (б)**

Для нахождения спектра амплитуд и фаз гармонических составляющих напряжения использовался алгоритм дискретного преобразования Фурье с прямоугольным измерительным окном. Перед началом измерений имеется возможность произвести настройку оборудования и параметров процесса измерений путем задания разрядности и частоты дискретизации преобразователей, длительности осциллограммы, содержания дополнительной гармоник в испытательном напряжении, времени задержек и т.д.

Для усиления сигнала испытательного напряжения использовался мостовой усилитель мощности с подключенным к его выходу повышающим трансформатором. При использовании в качестве повышающего трансформатора одного ТН типа НОМ-10 испытательное напряжение достигает 5,2 кВ. При каскадном включении двух ТН типа НОМ-6, испытательное напряжение составляло 4,8 кВ.

Образцовые делители напряжения ДН1 и ДН2 реализованы на основе резистивных делителей напряжения с сопротивлениями плеч ДН1: 8400 кОм (высоковольтное плечо) и 300 Ом (низковольтное плечо), ДН2: 28 кОм (высоковольтное плечо) и 60 Ом (низковольтное плечо).

Для исключения влияния входного импеданса АЦП на образцовые делители напряжения между ними устанавливалось согласующее устройство, выполненное на операционных усилителях с большим входным сопротивлением, включенных по схеме повторителя напряжения.

На последнем этапе создания прототипа АСК методом поэлементного исследования были определены его метрологические характеристики: экспериментальным путем – характеристики погрешности АЦП для 5-ти точек диапазона измерения и расчетным методом – АЧХ и ФЧХ делителей напряжения.

Результаты измерений погрешностей разработанного прототипа АСК показали, что, начиная с 8-ой гармонической составляющей напряжения, его погрешность (включая абсолютную погрешность по  $K_{U(n)}^{гр}$  для 2 – 5 точек диапазона измерения), при исключении систематической составляющей погрешности, удовлетворяет установленным нормам для всех 5-ти точек диапазона измерения. Содержание посторонних гармоник в испытательном напряжении не превышало 0,4 % (рисунок 2, б). Это подтверждает правильность установленных требований к ЦАП, АЦП и другим элементам АСК.

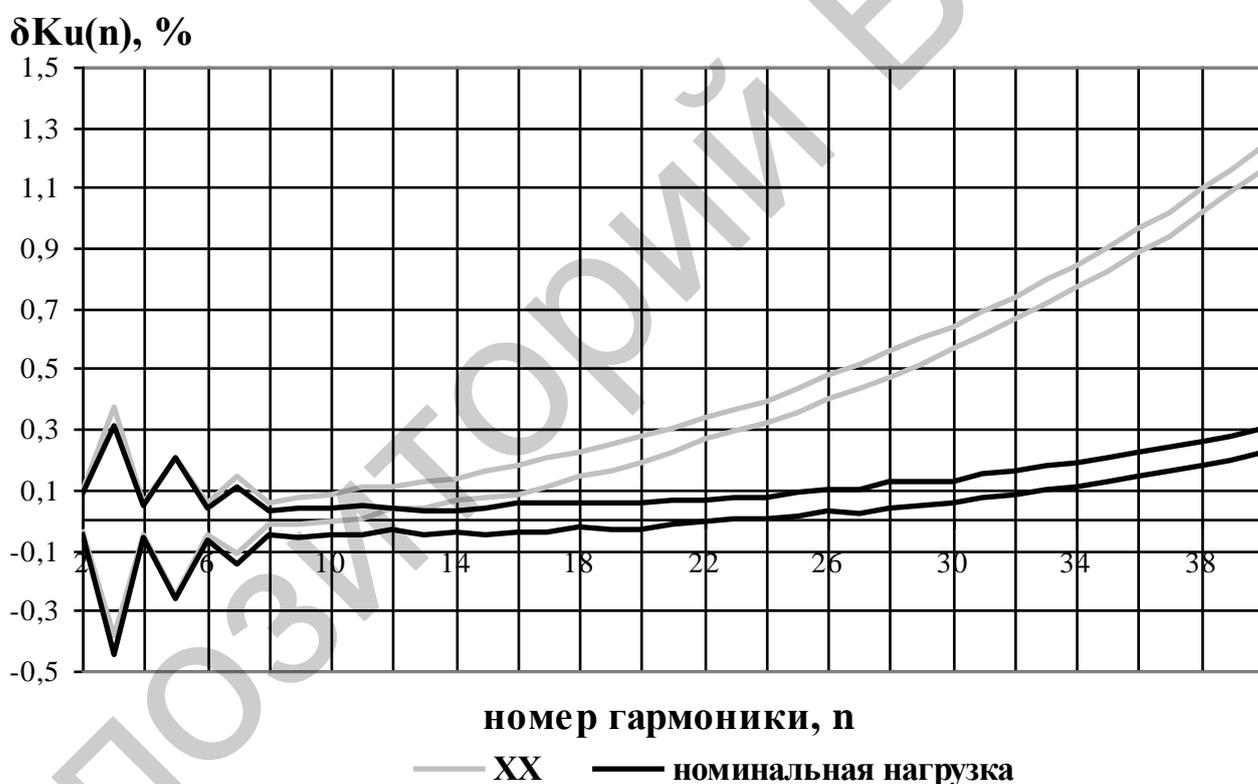
Разработанный прототип АСК может быть использован для исследований частотных характеристик ТН номинальным напряжением до 6 кВ.

**В четвертой главе** выполнена экспериментальная апробация разработанного метода контроля: исследованы частотные характеристики двух незаземляемых ТН типа НОМ-6 (номинальное напряжение 6 кВ) и одного НОМ-10.

Измерения частотных характеристик ТН типа НОМ-6 производились при холостом ходе (ХХ) и номинальной нагрузке в 50 ВА с  $\cos\varphi=1$  (соответствует

классу точности 0,5), НОМ-10 – при ХХ и нагрузке 50 ВА с  $\cos\varphi=1$ . При исследовании частотных характеристик ТН типа НОМ-6 на ХХ максимальное испытательное напряжение составляло 5,2 кВ, при номинальной нагрузке – 4,8 кВ. Испытательное напряжение для измерений частотных характеристик ТН типа НОМ-10 формировалось двумя включенными по каскадной схеме ТН типа НОМ-6 и составляло 4,8 кВ. Во всех случаях относительное содержание и фаза ВГ в испытательном напряжении были заданы на уровне 8 % и 0 эл.град. Выполнялось по 20 (НОМ-6) и по 5 (НОМ-10) измерений для каждого режима нагрузки ТН.

Результаты измерений показали, что исследованные ТН двух типов пригодны для контроля КЭ [3]. Неравномерность их АЧХ не превышает 2 % как при ХХ, так и при нагрузке 50 Вт (рисунок 3). Гармонические искажения напряжения, возникающие на выходе ТН при подаче на их вход синусоидального испытательного напряжения номинальной частоты, не превышают допустимую норму в 0,02 %.



**Рисунок 3 – Результаты измерений амплитудной погрешности трансформатора напряжения типа НОМ-6, представленные доверительным интервалом с вероятностью 0,95**

В то же время у ТН обоих типов были выявлены значительные угловые погрешности при нагрузке 50 Вт. Причем с ростом нагрузки ТН данная погрешность возрастала, и если при ХХ ТН типа НОМ-6 для 40-ой гармоники она составляла -0,8 эл.град., то при номинальной нагрузке достигла -7,5 эл.град. (рисунок 4).



**Рисунок 4 – Результаты измерений угловой погрешности трансформатора напряжения типа НОМ-6, представленные доверительным интервалом с вероятностью 0,95**

При приведении результатов измерений угловой погрешности ТН к доминирующей гармонике номинальной частоты видно, что резонансные явления в диапазоне частот 100 – 2000 Гц отсутствуют. В данном случае угловые погрешности ТН типов НОМ-6 и НОМ-10 на ВГ прямо пропорциональны порядку гармоник и определяются погрешностью на номинальной частоте.

В ходе исследований было отмечено совпадение результатов измерений амплитудной и угловой погрешности ТН, выполненных при испытательном напряжении в 2,6 и 5,2 кВ. Значительные расхождения наблюдаются только при гармонических составляющих  $n < 8$ , что можно объяснить увеличением погрешностей самого прототипа АСК.

Выполненная с помощью двух косвенных методов (экспериментального и расчетного) верификация полученных результатов измерений подтвердила их объективность. Необходимость ее проведения была обусловлена значительными расхождениями полученных результатов с опубликованными данными по частотным свойствам ТН типа НОМ-10 [1], где зафиксировано уменьшение угловой погрешности ТН с увеличением нагрузки.

Для экспериментального исследования влияния нагрузки ТН на его частотные характеристики была собрана АСК, аналогичная изображенной на рисунке 1, где в качестве образцового масштабного преобразователя напряжения использовался однотипный ТН, работающий в режиме XX. В данном случае сравнивались частотные характеристики двух однотипных ТН типа НОМ-6, один из

которых (образцовый) работал в режиме ХХ, а частотные характеристики второго исследовались при различной нагрузке. При этом измерительные сигналы в АЦП поступают от двух однотипных делителей напряжения на 100 В, что позволяет несколько компенсировать влияние их частотных характеристик на результаты измерений. Исключение из схемы первого делителя напряжения, метрологические характеристики которого были получены расчетным путем, избавляет от возможных неучтенных погрешностей измерений, вызванных им.

Экспериментально выполненная верификация, равно как и моделирование частотных характеристик ТН в программном математическом пакете MathCAD 2000, подтвердили достоверность результатов контроля. Кроме этого, при моделировании была доказана недостаточная точность расчетно-экспериментальных методов и необходимость прямых измерений частотных характеристик ТН.

Наиболее вероятной причиной выявленных расхождений полученных и ранее опубликованных результатов исследований являются отличия частотных характеристик конкретных экземпляров ТН.

Выявленный разброс индивидуальных частотных характеристик ТН, а также их зависимость от нагрузки подтверждают необходимость периодического контроля частотных характеристик ТН на месте эксплуатации с обязательным измерением параметров реальной нагрузки.

В главе приведены результаты измерений показателей КЭ (ПКЭ) на РП-19 (ОАО «САНТЭП») и ГПП-3 (РУП «Гомельский завод литья и нормалей»), позволяющие косвенно сравнить частотные характеристики установленных там ТН типа НТМИ-10. В обоих случаях различие результатов измерений по коэффициентам  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения не выходило за установленные в ГОСТ 13109-97 требования к погрешности измерений ПКЭ.

Экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность разработанного метода контроля частотных характеристик ТН, достигнутую повышением производительности и качества выполнения измерений.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

В соответствии с поставленной целью в диссертации получены следующие основные научные и практические результаты.

1. Определены требования к частотным характеристикам ТН, используемым при контроле и анализе КЭ. За их основу предложено принять нормы методических указаний РД 153-34.0-15.501-00 (Россия) к ТН, используемым в сферах государственного контроля и надзора [11]. Кроме этого, для ТН, приме-

няемых при анализе КЭ, должна быть установлена норма в пределах нескольких электрических градусов для погрешности измерений фаз  $n$ -ых гармонических составляющих напряжения. На практике соблюдение указанных норм может оказаться не всегда технически реализуемым и экономически оправданным. В этом случае полноценной заменой их соблюдению является учет реальных частотных характеристик, присущих отдельным типам или даже конкретным экземплярам ТН, при контроле и анализе КЭ [4].

2. Определены метрологические и технические требования к методу и средству контроля частотных характеристик ТН. На их основе разработан автоматизированный метод контроля частотных характеристик ТН, позволяющий производить также поверку и измерять реальную нагрузку ТН непосредственно на месте эксплуатации [2, 14]. В качестве средства контроля частотных характеристик ТН предложено использовать разработанную АСК, для каждого элемента которой определены основные технические и метрологические требования. Она может быть создана на основе стандартных элементов и блоков, что значительно упрощает практическую реализацию [13]. Предложен вариант укрупненной схемы алгоритма работы АСК для поверки и контроля частотных характеристик ТН.

3. Разработана методика учета частотных характеристик ТН при контроле и анализе КЭ в электрических сетях выше 1 кВ [12], позволяющая в целом повысить точность измерений и сэкономить значительные средства на замене уже установленных ТН [4].

4. Разработан и программно-аппаратно реализован прототип АСК [2]. Работа прототипа по предложенному алгоритму осуществляется с помощью специализированной программы "Harmonicas 3". Исследование метрологических характеристик разработанного прототипа показало, что его погрешности удовлетворяют установленным требованиям, а сам он может быть использован для апробации предложенного метода и исследований частотных характеристик ТН типа НОМ-6.

5. Экспериментально исследованы частотные характеристики ТН типа НОМ-6 и НОМ-10 при различных значениях испытательного напряжения и нагрузки [3]. При этом подтверждены высокая эффективность предлагаемой АСК и пригодность исследованных ТН для контроля КЭ. Неравномерность АЧХ ТН как при ХХ, так и при номинальной нагрузке не превышает 2 %. Гармонические искажения, возникающие на выходе ТН при подаче на его вход синусоидального испытательного напряжения номинальной частоты, не выходят за допустимые 0,02 %. В то же время у ТН обоих типов были выявлены значительные угловые погрешности на ВГ при номинальной нагрузке. Для 40-ой гармоники они могут достигать 6 ... 8 эл.град., что значительно превышает предложенные нормы и требует введения соответствующих поправок при анализе КЭ. Значительная зависимость частотных характеристик ТН от нагрузки доказывает

необходимость их периодического контроля на месте эксплуатации ТН с обязательным измерением его фактической нагрузки [4].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Предложенные нормы частотных характеристик ТН могут быть включены в разрабатываемые ТКП и другие ТНПА в области электромагнитной совместимости. Возможно, при накоплении достаточной статистической информации по частотным характеристикам ТН и практическим результатам контроля и анализа КЭ в предложенные нормы потребуется внести соответствующие поправки и изменения.

Разработанный метод и автоматизированная система контроля частотных характеристик ТН могут использоваться организациями, подведомственными Государственному комитету по стандартизации Республики Беларусь, а также филиалами «Энергосбыт» областных республиканских унитарных предприятий электроэнергетики. Предлагаемая автоматизированная система контроля частотных характеристик ТН является первым устройством такого рода, запатентованным в странах СНГ [13, 14]. Рассмотренный прототип АСК не позволяет производить поверку ТН, однако данная функция должна быть реализована в промышленном образце. Многофункциональность позволит в комплексе решить часть проблемы энергосбережения в Республике Беларусь за счет повышения точности учета электроэнергии и снижения потерь от ВГ в электрических сетях и электрооборудовании.

Полученные в диссертации результаты исследований уже используются лабораториями филиалов «Энергонадзор» и «Энергосбыт» РУП «Гомельэнерго» при контроле и анализе КЭ (копии актов внедрения и справок о возможном практическом применении результатов исследований приведены в приложении Г.8).

Расчет технико-экономического эффекта от внедрения результатов диссертационного исследования, выполненный на примере РУП «Гомельский завод литья и нормалей», подтвердил возможный потенциал повышения точности оценки ущерба от ВГ на сумму более 48 млн. руб (5400 \$) в год.

Дальнейшим перспективным направлением может стать расширение исследуемого частотного диапазона с целью изучения влияния ТН на результаты измерений переходных скоротечных процессов в энергосистеме, частотный спектр которых превышает 2 кГц (импульсы и провалы напряжения). Эти данные могут быть использованы как для научных исследований, так и при решении прикладных задач электроэнергетики (для более точного моделирования процессов в энергосистемах, а также при выборе и расчете устройств РЗА).

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в научных журналах*

1. Лымарь, О.В. Анализ существующего метода измерения частотных свойств трансформаторов напряжения, используемых для контроля показателей качества электроэнергии / О.В. Лымарь, О.Г. Широков // Вестник ГГТУ им. П.О.Сухого. – 2004. – № 1. – С. 41–46.

2. Широков, О.Г. Метод и средство измерения частотных свойств трансформаторов напряжения / О.Г. Широков, О.В. Лымарь // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2005. – № 3. – С. 34–39.

3. 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.

4. Широков, О.Г. Проблемы контроля и анализа качества электроэнергии в электрических сетях выше 1 кВ и пути их решения / О.Г. Широков, О.В. Лымарь // Энергетика (изв. высш. учебн. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2009. – № 6. – С. 16–22.

### *Материалы конференций*

5. Лымарь, О.В. Метрологические аспекты применения трансформаторов напряжения в схемах измерения показателей качества электроэнергии / О.В. Лымарь, О.Г. Широков // Сборник материалов международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и магистрантов, Гомель, 25 - 26 апреля 2002 г. / ГГТУ им. П.О.Сухого. – Гомель, 2002. – С. 120–122.

6. Лымарь, О.В. Метод измерения частотных характеристик трансформаторов напряжения / О.В. Лымарь, О.Г. Широков // Сборник материалов III международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и магистрантов, Гомель, 24 - 25 апреля 2003 г. / ГГТУ им. П.О.Сухого. – Гомель, 2003. – С. 175–178.

7. Широков, О.Г. Средство измерений частотных свойств трансформаторов напряжения, используемых для контроля показателей качества электроэнергии в электрических сетях / О.Г. Широков, О.В. Лымарь // Материалы III-й Международной научно-технической конференции “Аграрная энергетика в XXI-м столетии”, Минск, 21 - 23 ноября 2005 г. / РУП “Институт энергетики АПК НАН Беларуси”. – Минск, 2005. – С. 83–87.

### *Тезисы докладов*

8. Лымарь, О.В. Метод измерения частотных характеристик трансформаторов напряжения / О.В. Лымарь, О.Г. Широков // Современные проблемы машиноведения: тезисы докладов V Международной научно-технической конференции, Гомель, 1 - 2 июля 2004 г. / ГГТУ им. П.О.Сухого; под общ. ред.

С.Б. Сарело. – Гомель, 2004. – С. 121–122.

9. Лымарь, О.В. Частотные характеристики трансформатора напряжения НОМ-6 / О.В. Лымарь // Современные проблемы машиноведения: тезисы докладов V Международной научно-технической конференции, Гомель, 1 - 2 июля 2004 г. / ГГТУ им. П.О.Сухого; под общ. ред. С.Б. Сарело. – Гомель, 2004. – С. 118–119.

10. Лымарь, О.В. Метод и средство автоматизированного измерения частотных свойств трансформаторов напряжения / О.В. Лымарь // Современные проблемы машиноведения: тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции, Гомель, 19 - 20 октября 2006 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого; под общ. ред. С.Б. Сарело. – Гомель, 2006. – С. 107–108.

11. Широков, О.Г. Проблемы контроля качества электрической энергии в сетях выше 1 кВ и пути их решения / О.Г. Широков, В.Н. Петренко, О.В. Лымарь // Современные проблемы машиноведения: тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции, Гомель, 19 - 20 октября 2006 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого; под общ. ред. С.Б. Сарело. – Гомель, 2006. – С. 106–107.

12. Широков, О.Г. Методика учета частотных характеристик трансформаторов напряжения при контроле и анализе качества электроэнергии / О.Г. Широков, О.В. Лымарь // Современные проблемы машиноведения: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции, Гомель, 28 - 29 октября 2010 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого; под общ. ред. С.И. Тимошина. – Гомель, 2010. – С. 164–165.

### ***Патенты***

13. Устройство для автоматического измерения частотных характеристик трансформатора напряжения: пат. № 8884 Республики Беларусь, МПК G 01R 35/00 / О.В. Лымарь; заявитель УО “Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого”. – А20040286; заявл. 1.04.2004 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 1. – С. 121–122.

14. Устройство для автоматического измерения частотных характеристик трансформатора напряжения: пат. № 11918 Республики Беларусь, МПК G 01R 35/00 / О.Г. Широков, О.В. Лымарь; заявитель УО “Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого”. – А20070788; заявл. 25.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 3. – С. 160–161.

### ***Другие публикации***

15. Лымарь, О.В. Метрологические аспекты применения трансформаторов напряжения в схемах измерения показателей качества электрической энергии: дис. магистра техн. наук / О.В. Лымарь. – Гомель, 2002. – 111 л.

16. Петренко, В.Н. О контроле качества электрической энергии и необходимости поверки трансформаторов напряжения / В.Н. Петренко, О.В. Лымарь // Энергетическая стратегия. – 2009. – № 6. – С. 41–43.

## РЭЗІЮМЭ

Лымар Алег Уладзіміравіч

### Ацэнка і ўлік частотных характарыстык трансфарматараў напружання пры кантролі паказчыкаў несінусаідальнасці напружання

**Ключавыя словы:** трансфарматар напружання (ТН), частотныя характарыстыкі, якасць электраэнергіі, кантроль, аўтаматызаваная сістэма.

**Мэта работы:** павышэнне дакладнасці вынікаў кантролю паказчыкаў несінусаідальнасці напружання ў электрычных сетках вышэй за 1 кВ.

**Метады даследавання.** Пры вырашэнні пастаўленых задач выкарыстоўваўся сістэмны падыход з прымяненнем метадаў тэарэтычнага і колькаснага аналізу. Для пацверджання і абгрунтавання тэарэтычных высноў праводзіўся натурны эксперымент з выкарыстаннем распрацаванага спецыялізаванага электратэхнічнага абсталявання і сертыфікаваных сродкаў вымярэння.

**Атрыманыя вынікі і навізна.** Распрацаваны аўтаматызаваны метады кантролю частотных характарыстык ТН, які дазваляе вырабляць таксама паверку і вымяраць рэальную нагрузку ТН непасрэдна на месцы эксплуатацыі. Метады мяркуюць аўтаномную генерацыю моначасінавага полігарманічнага напружання з розным утрыманнем гарманічных складнікаў зададзеных амплітуд і фаз.

Упершыню прапанавана метадыка ўліку частотных характарыстык ТН пры кантролі і аналізе якасці электраэнергіі, якая дазваляе ў цэлым павысіць дакладнасць вымярэння і эканоміць значныя сродкі на замене ўжо ўсталяваных ТН.

Распрацаваны і выраблены прататыпы аўтаматызаванай сістэмы кантролю частотных характарыстык ТН, з дапамогай якога эксперыментальна даследаваны ТН тыпу НОМ-6 і НОМ-10 пры розных значэннях выпрабавальнага напружання і варыянтах нагрузкі. Пацверджана неабходнасць перыядычнага кантролю частотных характарыстык ТН на месцы іх эксплуатацыі і ўвядзення паправак у вынікі кантролю і аналізу якасці электраэнергіі.

**Ступень выкарыстання.** Вынікі даследаванняў прымяняюцца лабараторыямі філіялаў «Энерганагляд» і «Энергазбыт» РУП «Гомельэнерга» пры кантролі і аналізе якасці электраэнергіі ў электрычных сетках вышэй за 1 кВ.

**Галіна прымянення** – тэхнічная дыягностыка, у прыватнасці, кантроль тэхнічнага стану ТН па іх частотным характарыстыках, ўлічваемых пры кантролі паказчыкаў несінусаідальнасці напружання ў электрычных сетках вышэй за 1 кВ.

## РЕЗЮМЕ

Лымарь Олег Владимирович

### **Оценка и учет частотных характеристик трансформаторов напряжения при контроле показателей несинусоидальности напряжения**

**Ключевые слова:** трансформатор напряжения (ТН), частотные характеристики, качество электроэнергии, контроль, автоматизированная система.

**Цель работы:** повышение достоверности результатов контроля показателей несинусоидальности напряжения в электрических сетях выше 1 кВ.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовался системный подход с применением методов теоретического и численного анализа. Для подтверждения и обоснования теоретических выводов проводился натурный эксперимент с использованием разработанного специализированного электротехнического оборудования и сертифицированных средств измерений.

**Полученные результаты и новизна.** Разработан автоматизированный метод контроля частотных характеристик ТН, позволяющий производить также поверку и измерять реальную нагрузку ТН непосредственно на месте эксплуатации. Метод предполагает автономную генерацию моно- или полигармонического испытательного напряжения с различным содержанием гармонических составляющих заданных амплитуд и фаз.

Впервые предложена методика учета частотных характеристик ТН при контроле и анализе качества электроэнергии, позволяющая в целом повысить точность измерений и сэкономить значительные средства на замене уже установленных ТН.

Разработан и изготовлен прототип автоматизированной системы контроля частотных характеристик ТН, с помощью которого экспериментально исследованы ТН типа НОМ-6 и НОМ-10 при различных значениях испытательного напряжения и вариантах нагрузки. Подтверждена необходимость периодического контроля частотных характеристик ТН на месте их эксплуатации и введения поправок в результаты контроля и анализа качества электроэнергии.

**Степень использования.** Результаты исследований применяются лабораториями филиалов «Энергонадзор» и «Энергосбыт» РУП «Гомельэнерго» при контроле и анализе качества электроэнергии в электрических сетях выше 1 кВ.

**Область применения** – техническая диагностика, в частности, контроль технического состояния ТН по их частотным характеристикам, учитываемым при контроле показателей несинусоидальности напряжения в электрических сетях выше 1 кВ.

## SUMMARY

**Lymar Oleg Vladimirovich**

### **The assessment and accounting of frequency characteristics of voltage transformers at the indicator's control of a nonsinusoidal voltage**

**Keywords:** voltage transformer (VT), frequency characteristics, electric power quality, control, the automated system.

**The work purpose:** is to increase the result's reliability of indicator's control of a nonsinusoidal voltage in the electric networks higher than 1 kV.

**Research methods.** The systematic approach with methods of theoretical and numerical analysis was used by solving the problems. The natural experiment with using of developed specialized electrical equipment and certificated measuring facilities was made for the confirmation and substantiation of theoretical conclusions.

**The received results and novelty.** It was developed an automated control method of frequency characteristics of VT which allows to calibrate and to measure set-up demand of VT directly on site. This method involves the independent generation of mono- or polyharmonic test voltage with different harmonical content of the given amplitudes and phases.

For the first time it is proposed the accounting method of frequency characteristics of VT by monitoring and analyzing of electric power quality which allows to improve accuracy of measurement and to economize significant savings on the replacement of already installed VT.

Was developed and constructed automated control system prototype of VT with which were experimentally investigated the VT types NOM-6 and NOM-10 at different values of the test voltage and loading variants. Was confirmed the necessity of intermittent monitoring of the frequency characteristics of VT in place of their using and correcting actions in the control results and analysis of electric power quality

**The efficiency.** The research results are used by the laboratories of «Electric Inspection Service» and «Power Electricity Supply» of RUE «Gomelenergo» at the control and analysis of the electric power quality in the electric networks higher than 1 kV.

**The field of application** – is technical diagnostics, in particular, integrity monitoring of VT according to their frequency characteristics considered at the control of a nonsinusoidal voltage in the electric networks higher than 1 kV.

Научное издание

**Лымарь** Олег Владимирович

**ОЦЕНКА И УЧЕТ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.14.02 – Электростанции  
и электроэнергетические системы

Подписано в печать 27.09.2013. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 90. Заказ 984.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический  
университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.