На правах рукописи

ton

КАЦ ИЛЬЯ МАРКОВИЧ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОСТИ МОМЕНТОВ ВРЕМЕНИ НУЛЕВЫХ ПЕРЕХОДОВ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Специальность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Работа выполнена в ГОУ ВПО «Томский политехнический университет» на кафедре «Электрических станций».

Научный руководитель:	кандидат технических наук, доцент Гольдштейн Ефрем Иосифович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Манусов Вадим Зиновьевич
	кандидат технических наук, Калганов Сергей Александрович
Ведущая организация:	ООО «Томскэлектросетьпроект», г. Томск

Защита состоится «23» декабря 2009 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.10 при ГОУ ВПО «Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ.

Автореферат разослан «18» ноября 2009 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.10, д.т.н., профессор

Han fruite fr

Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В последние годы усилился интерес к устройствам функционального контроля (УФК) элементов электроэнергетических систем: линий электропередачи, трансформаторов, установок компенсации реактивной мощности, для распознавания повреждений на ранней стадии их развития, еще до срабатывания устройств релейной защиты.

Сотрудниками Южно-Российского государственного технического университета ведутся работы по созданию ряда комбинированных защитнодиагностических устройств как основы комплексов обеспечения «живучести» работы электроэнергетических систем (ЭЭС) в рамках АСУТП электрической части электростанций и электрических сетей.

В Донецком национальном техническом университете предложена интеллектуальная релейная защита, в состав которой входит экспертная система для определения места и степени локальных дефектов изоляции в сетях с изолированной нейтралью.

Близкие задачи решаются в Томском политехническом университете. Здесь по массивам мгновенных значений токов (ММЗ) и напряжений, получаемых с помощью регистраторов электрических сигналов, определяются параметры схем замещения (ПСЗ) элементов ЭЭС, а УФК ведут слежение за этими параметрами и делают, при необходимости, те или иные диагностические выводы.

Во многих УФК используются процедуры определения угла сдвига фаз (УСФ) между токами, токами и напряжениями, между напряжениями. К сожалению, в ЭЭС токи и напряжения зачастую несинусоидальны, что затрудняет контроль фазовых соотношений и заставляет использовать аппаратные или программные фильтры для выделения первых гармоник контролируемых сигналов. В этом случае УСФ вычисляются как разности времени между нулевыми переходами первых гармоник контролируемых сигналов.



Рис. 1. Кривые несинусоидальных и синусоидальных токов (напряжений)

Как показали исследования автора, в УФК целесообразно оперировать с разностью моментов времени нулевых переходов (далее – РМВНП) между контролируемыми величинами (см. рис. 1). Здесь ψ – РМВНП, выраженная в угловых величинах, φ – УСФ двух синусоидальных сигналов. Использование такого подхода позволяет значительно сократить вычислительные затраты и уменьшить требования к применяемым программно-аппаратным решениям.

Цель работы

Целью диссертационной работы является исследование возможности использования процедур определения разности моментов времени нулевых переходов по массивам мгновенных значений токов и напряжений при создании устройств функционального контроля линий электропередач (ЛЭП), трансформаторов, конденсаторных устройств компенсации реактивной мощности (КУ).

Для достижения указанной цели необходимо:

1) детально исследовать процедуры определения РМВНП между токами, напряжениями, токами и напряжениями на основе использования ММЗ;

2) оценить работоспособность различных методов определения РМВНП на примерах задач по функциональному контролю (ФК) ЛЭП; однофазных и трехфазных трансформаторов; КУ.

Методы исследований

Для решения поставленных в работе задач используются: фундаментальные законы теоретических основ электротехники; методы обработки информации с помощью ЭВМ; методы математического моделирования; вычислительные и физические эксперименты.

Достоверность результатов

подтверждается использованием известных, проверенных методик и уравнений, результатами проведенных вычислительных и физических экспериментов, оценками точности полученных результатов.

Научная новизна и результаты, выносимые на защиту

1. Предложен подход к определению УСФ между несинусоидальными токами и напряжениями в задачах ФК элементов ЭЭС как РМВНП между ними, в основе которого лежит непосредственное использование информации, представленной в ММЗ.

2. Детально исследованы и сопоставлены между собой: метод определения РМВНП, основанный на использовании теоремы квазимощности Телледжена; метод определения РМВНП, основанный на использовании разложения токов (напряжений) в ряд Фурье; методы определения РМВНП, основанные на интерполяции токов (напряжений);

3. Показана применимость разработанных методов для решения задач по ФК: ЛЭП при двухсторонних и односторонних замерах токов и напряжений; однофазных и трехфазных трансформаторов; трехфазных конденсаторных устройств компенсации реактивной мощности.

Практическая ценность результатов проведенных исследований

• подтверждена патентным ведомством РФ – получено 8 патентов РФ;

• детально исследованные процедуры определения РМВНП между несинусоидальными токами и напряжениями могут быть использованы при решении широкого круга задач по ФК элементов ЭЭС;

• разработанный виртуальный генератор периодических сигналов может быть использован при поверке фазоизмерительных устройств, различных алгоритмов ФК элементов ЭЭС, работающих в условиях несинусоидальных токов и напряжений.

Реализация результатов работы

Основные результаты работы используются при определении РМВНП при решении задач по оценке функционирования различных элементов ЭЭС при несинусоидальных токах и напряжениях в филиале ОАО «МРСК Сибири» – «Омскэнерго» (г. Омск) и ООО «Электроцех» (г. Томск).

Личный вклад автора

Все работы по теме диссертации осуществлены автором или при его основном участии: постановка задачи определения УСФ между несинусоидальными токами и напряжениями в задачах ФК элементов ЭЭС как РМВНП между ними, разработка виртуального генератора периодических сигналов, выбор методов определения РМВНП, проведение теоретических исследований влияния различных факторов на точность вычисления РМВНП с помощью выбранных методов и их сопоставление между собой, постановка и проведение вычислительных экспериментов на математических моделях элементов ЭЭС, обработка и анализ полученных результатов, формулировка основных выводов диссертационной работы.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на следующих международных и всероссийских конференциях:

• Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2005–2008 гг.);

• II Международном семинаре «Физико-математическое моделирование систем» (г. Воронеж, 2005 г.);

• Международном научно-техническом семинаре «Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии» (г. Томск, 2006 г.);

• Всероссийской конференции-конкурсе инновационных проектов студентов и аспирантов «Энергетика и энергосбережение» (г. Томск, 2006 г.);

• 51 международной конференции «Faculty of Electrical Engineering and Information Technology» (г. Ильменау (Германия), 2006 г.);

• Технических совещаниях ОАО «МРСК Сибири» – «Омскэнерго» (г. Омск), ООО «Электроцех» (г. Томск).

Публикации

По результатам проведенных исследований опубликовано 22 печатных работы, включая 8 патентов РФ на изобретения и полезные модели, 3 статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 97 наименований, 2-х приложений. Общий объем диссертации 159 страниц, в т. ч.: 112 рисунков и 48 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и дана общая характеристика выполненной работы. Сформулированы цель работы, научная новизна и практические результаты.

В первой главе приведены общие сведения об известных системах ФК элементов ЭЭС, показаны особенности их использования при проведении контроля оборудования в рабочем режиме.

Даны общие сведения о РЭС. Обращено внимание на то, что среди используемых в настоящее время в ЭЭС РЭС только регистраторы SMART-WAMS и Парма имеют встроенные функции получения «согласованных» (синхронизированных) измерений.

Проведенный анализ научно-технической литературы показал:

• перспективным является разработка и развитие методов определения РМВНП на основе ММЗ токов и напряжений;

актуальным является развитие УФК электрооборудования по их ПСЗ;

• в литературе не описаны процедуры формирования несинусоидальных сигналов с заданным значением РМВНП между ними.

Все вышеизложенное позволяет сформулировать основные задачи, решаемые в диссертационной работе:

• создание виртуального генератора периодических сигналов сложной формы (ВГПС) с заданным значением моментов времени нулевого перехода (МВНП);

• детальное исследование процедур определения РМВНП между несинусоидальными токами и напряжениями, основанных на использовании квазимощностей, разложении анализируемых напряжений (токов) в ряд Фурье, интерполяции анализируемых напряжений (токов) с помощью тестовых и реальных сигналов;

• оценка возможности использования рассматриваемых методов в процедурах ФК ЛЭП, однофазных и трехфазных трансформаторов, КУ.

Во второй главе рассмотрены вопросы формирования тестовых сигналов с задаваемыми значениями МВНП $\psi_{H\Pi}$.

Описывается созданный автором ВГПС с задаваемыми значениями их МВНП. Он обеспечивает:

• воспроизведение сложных п-частотных сигналов заданной формы

$$a_n(t_j) = A_k \sum_{k=1}^k k_{a_k} \cdot \sin(k\omega t_j \pm \phi_k), \qquad k_{a_k} = \frac{A_k}{A_l} \tag{1}$$

в виде MM3 с числом отсчетов на периоде N = 8,12,24...1024 и заданным значением $\psi_{H\Pi}$ в диапазоне от 0⁰ до 360⁰;

• погрешность воспроизведения $\psi_{H\Pi}$ сигналов не более $0, 1^0$;

• постоянство амплитуды выходного напряжения во всем диапазоне регулирования значения $\psi_{H\Pi}$.

При формировании многочастотных сигналов с помощью ВГПС необходимо задавать большое количество перестраиваемых параметров. Поэтому для удобства его использования входные параметры были разделены на основные (значение $\psi_{H\Pi}$ сигнала; его круговая частота ω ; число отсчетов на периоде; амплитуда A_1 первой гармоники сигнала) и вспомогательные (гармонический состав сигнала; отношения амплитуд k - ых гармоник к первой (k_{a_k}) ; начальные фазы второй и последующих гармоник (ϕ_k).

Возможные значения МВНП определяются решением уравнения

$$a_n(t_j) = A_k \sum_{k=1}^k k_{a_k} \cdot \sin(kx_a \pm \phi_k) = 0.$$
 (2)

Алгоритм работы ВГПС заключается в следующем:

1) производят ввод параметров, значения которых известны;

2) недостающие параметры задают случайным образом, а значение фазы основной гармоники для первого шага итерации $\phi_{a1}(n)$ принимают равным значению $\psi_{H\Pi}$;

вычисляют расчетное МВНП $\psi^p_{H\Pi}$ и сравнивают его с заданным; 3)

вычисляют значение фазы основной гармоники для следующего шага 4) итерации $\phi_{a1}(n+1)$

$$\phi_{a1}(n+1) = \phi_{a1}(n) + \frac{\psi_{H\Pi}^{p} - \psi_{H\Pi}}{2}; \qquad (3)$$

5) повторяют действия по пп. 3 и 4, добиваясь выполнения условия

$$\psi^p_{H\Pi} = \psi_{H\Pi}$$

Проведенная оценка точности воспроизведения сигнала с заданным МВНП показала, что абсолютная погрешность воспроизведения МВНП во всех случаях не превышает 0,1⁰, что позволяет использовать предлагаемый ВГПС в качестве образцовой меры МВНП сигнала сложной формы для поверки работоспособности рассматриваемых методов определения РМВНП.

В качестве примера на рис. 2 приведен тестовый сигнал с заданными значениями перестраиваемых параметров: $\psi_{H\Pi} = -40^{\circ}$, $k_{a_1} = 70\%$, $k_{a_3} = 20\%$, $k_{a_5} = 15\%$ $A_1 = 100$, $\omega = 314 c^{-1}$, N = 32, полученный с помощью ВГПС.

Третья посвящена глава методам определения РМВНП, основанным на использовании теоремы Телледжена И полученным на их основе расчетным формулам (далее – метод 1):



Рис. 2. Трехчастотный сигнал, полученный с помощью ВГПС

$$\psi_{a,b} = \arcsin\left(\frac{\dot{Q}_{a,b}}{A \cdot B}\right); \quad (4) \quad \psi_{a,b} = \arccos\left(\frac{\dot{P}_{a,b}}{A \cdot B}\right); \quad (5) \quad \psi_{a,b} = \arctan\left(\frac{\dot{Q}_{a,b}}{\dot{P}_{a,b}}\right), \quad (6)$$
$$\dot{P}_{a,b} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} a(t_j) \cdot b(t_j); \quad \dot{Q}_{a,b} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \sum_{j=1}^{N} \left(a(t_{j+1}) - a(t_j)\right) \cdot \left(b(t_{j+1}) + b(t_j)\right); (7)$$
$$A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} a^2(t_j)}; \qquad B = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} b^2(t_j)}. \quad (8)$$

Здесь: $\dot{P}_{a,b}$ и $\dot{Q}_{a,b}$ – активная и реактивная квазимощности; A и B – действующие значения токов (напряжений) $a(t_i)$ и $b(t_i)$, представленные MM3:

$$a(t_j)\Big|_{j=1}^N = a(t_1), a(t_2), \dots, a(t_N); b(t_j)\Big|_{j=1}^N = b(t_1), b(t_2), \dots, b(t_N); \quad t_j = t_{j-1} + \Delta t; N = T/\Delta t,$$

где T – период; Δt – шаг дискретизации; N - число отсчетов на периоде T.

Проведены исследования точности вычисления РМВНП (между двумя синусоидальными токами (напряжениями); между токами (напряжениями) синусоидальной и несинусоидальной формы; между двумя несинусоидальными токами (напряжениями)) при различных значениях параметров данных сигналов. Показано, что при $N \ge 24$ наиболее работоспособной является формула (5), особенно при токах (напряжениях), близких к синусоидальным. Установлена необходимость дополнить процедуры определения РМВНП правилами приведения:

$$\psi_{a,b}^{npue.} = |\psi_{a,b_p}|, \text{ если } \dot{P}_{a,b} > 0 \text{ и } \dot{Q}_{a,b} > 0$$
, РМВНП принадлежит *I* четверти;
 $\psi_{a,b}^{npue.} = |\psi_{a,b_p}|, \text{ если } \dot{P}_{a,b} < 0 \text{ и } \dot{Q}_{a,b} > 0$, РМВНП принадлежит *II* четверти;
 $\psi_{a,b}^{npue.} = -|\psi_{a,b_p}|, \text{ если } \dot{P}_{a,b} < 0 \text{ и } \dot{Q}_{a,b} < 0$, РМВНП принадлежит *III* четверти;
 $\psi_{a,b}^{npue.} = -|\psi_{a,b_p}|, \text{ если } \dot{P}_{a,b} > 0 \text{ и } \dot{Q}_{a,b} < 0$. РМВНП принадлежит *IV* четверти;

где ψ_{a,b_p} – значение РМВНП, вычисленное по соотношению (5); ψ_{a,b_p}^{npue} – значение РМВНП с учетом правил приведения.

Для примера в табл. 1 представлены результаты расчетов РМВНП между током и напряжением:

$$u(t_j) = 100\sin(\omega t_j - 120), \quad i(t_j) = 50\sin(\omega t_j + 10).$$
 (9)

Таблица 1 Результаты расчетов РМВНП между током и напряжением

$\dot{Q}_{u,i}$	$\dot{P}_{u,i}$	U, B	I, A	ψ_{u,i_p} , град	$\psi^{npu {\it B}.}_{u,i}$, град.
-1910	-1608	70,7	35,35	130,01	-130,01

Четвертая глава посвящена вопросам определения РМВНП посредством фиксации нулевых переходов анализируемых токов и напряжений.

1. Первый путь: на основе разложения анализируемых токов (напряжений) в ряд Фурье и фиксации соответствующего нулевого перехода (метод 2).

2. Второй путь: на основе использования параболической (метод 3) и линейной (метод 4) интерполяции анализируемых токов и напряжений.

В первом случае используется двухэтапная процедура:

1. Разложение исследуемых токов (напряжений) $a(t_i)$ и $b(t_i)$ в ряд Фурье:

$$a_f(t_j) = \sum_k A_k \cdot \sin(k\omega t + \phi_{ak}); \quad b_f(t_j) = \sum_k B_k \cdot \sin(k\omega t + \phi_{bk}), \quad (10)$$

где A_k и B_k , ϕ_{ak} и ϕ_{bk} – амплитуды и фазы k -х гармоник, $k = 1, 2, 3 \dots$ n;

2. Определение нулевых переходов этих токов (напряжений) путем решения уравнений

$$\sum_{k} A_{k} \cdot \sin(kx_{a} + \phi_{ak}) = 0; \quad \sum_{k} B_{k} \cdot \sin(kx_{b} + \phi_{bk}) = 0.$$
(11)

Далее определяют РМВНП между токами (напряжениями) $a(t_j)$ и $b(t_j)$

$$\psi_{a,b} = \|x_b| - \|x_a\|.$$
(12)

Во втором случае для определения РМВНП с помощью линейной интерполяции производят поиск пар отсчетов $a(t_w)$ и $a(t_i)$, при которых происходит смена полярности тока (напряжения) (см. рис. 3). Затем заменяют исследуемый ток (напряжение) $a(t_i)$ интерполирующей функцией $y(t_i)$ на интервале $[t_w; t_i]$:

$$y(t_j) = r \cdot t_j + h; \quad r = (a(t_w) - a(t_i))/(t_w - t_i); \quad h = a(t_i) - r \cdot t_i.$$
 (13)

Момент времени t_{n1} , соответствующий первому переходу сигнала $a(t_j)$ через нулевой уровень, определяется по соотношению:

$$t_{n1} = [t_i \cdot a(t_w) - a(t_i) \cdot t_w] / [a(t_w) - a(t_i)].$$
(14)

Затем по аналогичной процедуре определяют момент времени t_{n2} , соответствующий новому переходу сигнала $a(t_j)$ от отрицательных значений к положительным. Далее вычисляют значение МВНП тока (напряжения) $a(t_j)$

$$\psi^{a}_{H\Pi} = 360 \cdot t_{n1} / (t_{n2} - t_{n1}).$$
(15)

При параболической интерполяции (см. рис. 4) имеем:

$$y(t_{j}) = d \cdot t^{2} + h \cdot t + g;$$

$$d = \frac{\left[x(t_{w}) - x(t_{p})\right] \cdot t_{i} + \left[x(t_{p}) - x(t_{i})\right] \cdot t_{w} + \left[x(t_{i}) - x(t_{w})\right] \cdot t_{p}}{(t_{p} - t_{w}) \cdot t_{i}^{2} + (t_{w}^{2} - t_{p}^{2}) \cdot t_{i} - t_{w}^{2} \cdot t_{p} + t_{p}^{2} \cdot t_{w}};$$

$$h = \frac{\left[x(t_{p}) - x(t_{w})\right] \cdot t_{i}^{2} + \left[x(t_{i}) - x(t_{p})\right] \cdot t_{w}^{2} + \left[x(t_{w}) - x(t_{i})\right] \cdot t_{p}^{2}}{(t_{w} - t_{i}) \cdot (t_{p}^{2} - t_{p}(t_{w} + t_{i}) + t_{i}t_{w})}; \quad t_{p} = t_{i+1};$$

$$g = \frac{\left[x(t_{w}) \cdot t_{p} - x(t_{p}) \cdot t_{w}\right] \cdot t_{i}^{2} + \left[x(t_{p}) \cdot t_{w}^{2} - x(t_{w}) \cdot t_{p}^{2}\right] \cdot t_{i} + \left[t_{p}^{2} \cdot t_{w} - t_{w}^{2} \cdot t_{p}\right] \cdot x(t_{i})}{(t_{w} - t_{i}) \cdot \left[(t_{w} - t_{p}) \cdot t_{i} - t_{w} \cdot t_{p} + t_{p}^{2}\right]}$$

Момент времени *t*_{n1} находят по переходу через нулевой уровень интерполирующей функции (16):

$$d \cdot t_{n1}^{2} + h \cdot t_{n1} + g = 0; \qquad t_{n1} = \begin{cases} t^{\parallel} = \frac{-h - \sqrt{h^{2} - 4 \cdot d \cdot g}}{2 \cdot d}, ecnu \ t_{w} < t^{\parallel} \le t_{i}; \\ t^{\parallel} = \frac{-h + \sqrt{h^{2} - 4 \cdot d \cdot g}}{2 \cdot d}, ecnu \ t_{w} < t^{\parallel} \le t_{i}. \end{cases}$$
(17)

По аналогичной процедуре определяют момент времени t_{n2} и по формуле (15) определяют значение МВНП тока (напряжения).

Аналогичным образом определяется МВНП второго тока (напряжения). РМВНП определяют как разность фаз первого и второго тока (напряжения).



Рисунок 3.

Рисунок 4.

При лабораторных исследованиях формирование тестовых сигналов производилось с помощью ВГПС, описанного в гл. 2. Затем производился расчет РМВНП по формуле (15); проводилось сравнение «точных» и расчетных значений РМВНП; рассчитывались значения абсолютных и относительных погрешностей вычисления РМВНП.

Проведенная оценка влияния параметров одно-, двух- и трехчастотных токов (напряжений) (шага дискретизации, амплитуд и фаз гармонических составляющих и т. п.) на точность вычислений РМВНП показала, что все описанные в главе 4 методы обеспечивают определение РМВНП как между синусоидальными, так и несинусоидальными токами (напряжениями).

При использовании разложения сигналов в ряд Фурье для трехфазных цепей расчеты необходимо дополнить вычислениями активных и реактивных квазимощностей и применять правила приведения:

 $\psi_{a,b}^{npue.} = |\psi_{a,b}|, \text{ если } \dot{P}_{a,b} > 0 \text{ и } \dot{Q}_{a,b} > 0.$ РМВНП принадлежит *I* четверти; $\psi_{a,b}^{npue.} = |\psi_{a,b}| + \pi, \text{ если } \dot{P}_{a,b} < 0 \text{ и } \dot{Q}_{a,b} > 0.$ РМВНП принадлежит *II* четверти; $\psi_{a,b}^{npue.} = |\psi_{a,b}| - \pi, \text{ если } \dot{P}_{a,b} < 0 \text{ и } \dot{Q}_{a,b} < 0.$ РМВНП принадлежит *III* четверти; $\psi_{a,b}^{npue.} = -|\psi_{a,b}|, \text{ если } \dot{P}_{a,b} > 0 \text{ и } \dot{Q}_{a,b} < 0.$ РМВНП принадлежит *IV* четверти;

В качестве примера в табл. 2 представлены результаты расчетов РМВНП между токами и напряжениями, токами, напряжениями:

$a(t_j) = 100\sin(\omega t_j - 120) + 15\sin(3\omega t_j + 10);$	$b(t_j) = 50\sin(\omega t_j + 10) + 10\sin(3\omega t_j - 10).$ (18)
Таблина 2 – Результаты расчетов РМВНГ	I межлу сигналами (18)

		- 19			
Определение РМВНП по	Точное значение	ψ_{a,b_p} ,	$\psi^{npub.}_{a,b}$, град.	\dot{Q}_{ab}	<i>P</i> _{a b} −
соотношению	РПМНП, град	град	· <i>u</i> , <i>o</i> -	- 0,0	,0
(13)		-124,105	-		
(16)	-124,065	-124,086	-	-1800	-1542
(12)		54,497	-124,503		

Пятая глава диссертации посвящена: оценке инструментальных погрешностей измерения РМВНП; сопоставлению разработанных методов определения РМВНП; примерам использования разработанных процедур в УФК элементов ЭЭС.

На рис. 5 приведена структурная схема измерительной системы (ИС), реализующей разработанные в настоящей работе методы. Она состоит из: измери-

10

тельных трансформаторов тока (TT) и напряжения (TH), регистраторов электрических сигналов (РЭС); устройств сбора и передачи данных; канала связи; средств обработки информации (ЭВМ).



Инструментальная погрешность δ_u ИС, состоящей из т последовательно соединенных звеньев с независимыми случайными погрешностями δ_{ui} каждого звена, находилась по известному выражению:

$$\delta_u = \sqrt{\sum_{i=1}^m \delta_{ui}^2}.$$
(19)

Инструментальная погрешность измерительной линейки, состоящей из т однотипных звеньев, соединенных параллельно, определялась по формуле

$$\delta_u = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \delta_{ui}^2}.$$
(20)

Погрешностями каналов связи и средств обработки информации можно пренебречь, тогда основной интерес представляют угловая $(\Delta_{TT}_{\phi}, \Delta_{TH}_{\phi}, \Delta_{P \ni C}_{\phi(I)}, \Delta_{P \ni C}_{\phi(U)})$ и амплитудная погрешности $(\delta_{TT}_{i\%}, \delta_{TT}_{u\%}, \delta_{P \ni C}_{i\%}, \delta_{P \ni C}_{u\%})$ основных узлов ИС.

Суммарная инструментальная погрешность определения РМВНП между то-ком и напряжением находилась по выражению:

$$\delta_{u_{\Sigma}} = \sqrt{\delta_{u_{A}}^{2} + \delta_{u\phi}^{2}} = \sqrt{\delta_{TT_{i}}^{2} + \delta_{P \ni C_{i}}^{2} + \delta_{TH_{u}}^{2} + \delta_{P \ni C_{u}}^{2} + \left(\frac{\Delta_{u_{\Phi}(I)}}{\phi_{I}} \cdot 100\%\right)^{2} + \left(\frac{\Delta_{u_{\Phi}(U)}}{\phi_{U}} \cdot 100\%\right)^{2} + \left(\frac{$$

Суммарная инструментальная погрешность определения РМВНП между двумя токами определялась по формуле:

$$\delta_{u_{\Sigma}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\delta_{i_{A}}^{2} + \delta_{i\phi}^{2} \right)} = \sqrt{\delta_{TT}_{i}^{2} + \delta_{P \ni C_{i}}^{2} + \left(\frac{\Delta_{u_{\Phi}(I)}}{\phi_{I}} \cdot 100\% \right)^{2}}.$$
 (21)

Суммарная инструментальная погрешность определения РМВНП между двумя напряжениями определялась по соотношению:

$$\delta_{u_{\Sigma}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\delta_{u_{A}}^{2} + \delta_{u\phi}^{2} \right)} = \sqrt{\delta_{P \ni C_{i}}^{2} + \delta_{TH_{u}}^{2} + \left(\frac{\Delta_{u_{\Phi}(U)}}{\phi_{U}} \cdot 100\% \right)^{2}}.$$
 (22)

В приведенных формулах:

$$\delta_{u_{I}} = \sqrt{\delta_{TT} _{i\%}^{2} + \delta_{P \ni C} _{i\%}^{2}}, \qquad \delta_{u_{U}} = \sqrt{\delta_{TH} _{u\%}^{2} + \delta_{P \ni C} _{u\%}^{2}};$$

$$\Delta_{u_{\Phi}(I)} = \sqrt{\Delta_{TT} _{\phi}^{2} + \Delta_{P \ni C} _{\phi(I)}^{2}}, \qquad \Delta_{u_{\Phi}(U)} = \sqrt{\Delta_{TH} _{\phi}^{2} + \Delta_{P \ni C} _{\phi(U)}^{2}},$$

где δ_{u_I} , δ_{u_U} – суммарные амплитудные погрешности измерения тока и напряжения; $\Delta_{u_{\Phi}(I)}$, $\Delta_{u_{\Phi}(U)}$ – суммарные угловые погрешности измерения тока и напряжения.

Для определения методической погрешности вычисления РМВНП необходимо сопоставить результаты «точного» измерения с измерениями в том или ином конкретном случае

$$\Delta_{\mathcal{M}} = \left\| \psi_{a,b_P} \right\| - \left| \psi_{a,b_T} \right\|, \quad \delta_{\mathcal{M}} = \left| \Delta / \psi_{a,b_T} \right| \cdot 100\%, \tag{23}$$

где Δ_{M} – абсолютная методическая погрешность; $\psi_{a,b_{P}}$ - значение РМВНП, полученное расчетным путем; $\psi_{a,b_{T}}$ – «точное» значение РМВНП; δ_{M} – относительная методическая погрешность.

При известных инструментальных и методических погрешностях общая погрешность измерений определялась выражением

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_u^2 + \delta_{\mathcal{M}}^2}.$$
 (24)

Как было показано в главах 3 и 4, методические погрешности предлагаемых методов определения РМВНП составляют доли процентов, поэтому ими можно пренебречь.

Как видно из соотношения (22), инструментальная погрешность зависит от величин МВНП исследуемых сигналов (см. рис. 6.).



Рисунок 6. Зависимости $\delta_{u_{\Sigma}}$ от величин фаз при определении РМВНП:

а) между током и напряжением; б) токами; в) напряжениями.

Основными критериями для сопоставления описанных в главах 3 и 4 процедур являются точность вычисления РМВНП и их трудоемкость.

Оценка точности вычисления РМВНП производилась на основе расчетов методической погрешности.

В табл. 3 приведены результаты сравнительных исследований по определению методической погрешности при расчете РМВНП. При этом использовались сформированные с помощью ВГПС тестовые сигналы.

Для анализа трудоёмкости разработанных процедур определения РМВНП был использован подход, в котором все структуры алгоритмов разбиваются на

последовательности элементарных операций, и производится подсчет их количества.

Таблица 3

Тесторые сигнала		$\delta_{_{\mathcal{M}}}$ метода, %			
	1	2	3	4	
$a(t_j) = 100\sin(\omega t_j + 60), b(t_j) = 100\sin(\omega t_j + 30).$	0,047	0,02	0,002	0,002	
$a(t_j) = 100\sin(\omega t_j),$ $b(t_j) = 100(\sin(\omega t_j + 30) + 0.5 \cdot \sin(3 \cdot \omega t_j + 10)).$	11,7	0,0005	0,046	0,013	
$a(t_j) = 80\sin(\omega t_j + 30) + 50 \cdot \sin(3 \cdot \omega t_j + 20) + 30 \cdot \sin(5 \cdot \omega t_j + 45)),$ $b(t_j) = 17,87\sin(\omega t_j - 18) + 5,59 \cdot \sin(5 \cdot \omega t_j + 120)).$	21	0,0001	0,0002	0,076	

В табл. 4 приведены оценочные сведения о трудоемкости рассматриваемых процедур определения РМВНП при N = 48 и k = 1..10.

Таблица 4

Метод	Число элементарных операций
1	371
2	8506
3	296
4	685
Фильтрация основной гармоники одного сигнала	636

Приведенные в табл. 4 сведения о количестве операций, необходимых для проведения фильтрации сигналов, показывают, что применение используемых в настоящее время в ЭЭС методов определения УСФ между несинусоидальными сигналами по их основным гармоникам значительно увеличивает трудоемкость проведения ФК элементов ЭЭС. Как видно из табл. 4, по степени возрастания вычислительных затрат рассмотренные методы располагаются следующим образом: 1) метод, основанный на использовании линейной интерполяции; 2) метод, основанный на использовании параболической интерполяции; 3) метод, основанный на использовании теоремы квазимощности; 4) метод, основанный на использовании теоремы квазимощности; 4) метод, основанный на разложении сигналов в ряд Фурье.

Для оценки возможности использования рассматриваемых процедур определения РМВНП между токами и напряжениями, протекающих в исследуемых элементах ЭЭС, на цифро-аналого-физической модели одноцепной ЛЭП и однофазного трехобмоточного трансформатора «Научно-исследовательского института по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения» (НИИПТ) были проведены измерения РМВНП между соответствующими токами и напряжениями. Оценка возможности использования процедур определения РМВНП для трехфазных конденсаторных устройств компенсации реактивной мощности была проведена на основе ММЗ токов и напряжений, полученных на КУ БКЭ-1,05-252-У1 и КЭС1 1,05 63 1У1, установленных на ПС «Восточная» и «Катыльгинская».Для оценки точности вычислений были использованы интервальные значения РМВНП, полученные непосредственно по осциллограммам. Как показали исследования, значения РМВНП, рассчитанные рассматриваемыми методами, соответствуют значениям, полученным непосредственно по осциллограммам. На математических моделях элементов ЭЭС в среде Matlab были проведены исследования оценки возможности реализации УФК по ПСЗ при известных значениях РМВНП.

Для оценки возможности реализации УФК ЛЭП в программе Matlab была исследована П-образная схема замещения ЛЭП 110 кВ (см. рис. 7) с односторонним питанием. На рис. 8 приведена схема модели.



При рассмотрении принципа функционирования УФК ЛЭП будем считать, что кривые мгновенных значений токов и напряжений фаз синусоидальны.

Функционирование УФК может быть реализовано двумя путями:

• на основе проведения двухсторонних синхронизированных измерений ММЗ токов и напряжений в начале и в конце контролируемой линии и сравнения ПСЗ для текущего и заведомо исправного состояния;

• на основе проведения односторонних измерений ММЗ токов и напряжений на входе ЛЭП и контроле ее входного сопротивления;

Вычисление ПСЗ производилось по следующему алгоритму:

- 1. Измеряют ММЗ входных и выходных токов $i_1(t_j)$ и $i_2(t_j)$ и напряжений $u_1(t_j)$ и $u_2(t_j)$; ММЗ токов $i_{01}(t_j)$ и $i_{02}(t_j)$ в поперечных ветвях схемы.
- 2. Определяют напряжения $u_{12}(t_j)$ и ток $i_{12}(t_j)$ в продольной ветви схемы:

$$u_{12}(t_j) = u_1(t_j) - u_2(t_j); \quad (25) \qquad \qquad i_{12}(t_j) = i_1(t_j) - i_2(t_j); \quad (26)$$

3. Вычисляют ПСЗ исследуемой ЛЭП

$$Z_{1} = \frac{U_{12}}{I_{12}} \cdot e^{j\psi_{12}}; \quad Z_{01} = \frac{U_{1}}{I_{01}} \cdot e^{j\psi_{01}}; \quad Z_{02} = \frac{U_{2}}{I_{02}} \cdot e^{j\psi_{02}}, \tag{27}$$

где ψ_{12} – РМВНП между напряжением $u_{12}(t_j)$ и током $i_{12}(t_j)$; ψ_{01} – РМВНП между напряжением $u_1(t_j)$ и током $i_{01}(t_j)$; ψ_{02} – РМВНП между напряжением $u_2(t_j)$ и током $i_{02}(t_j)$.

В табл. 5 приведены результаты определения ПСЗ рассматриваемой ЛЭП при различных сопротивлениях нагрузки Z_{harp} и неизменных параметрах модели.

Таблица 5				
Z _{нагр} ,Ом	<i>Z</i> ₁ ,Ом	$ Z_1 $,Ом	Z ₀₂ ,Ом	Z ₀₂ ,Ом
10	19,9 + j41.784	46,28	749300	-j749300
100	19,9 + j41.784	46,28	749300	-j749300
j31.4	19,903 + j41.783	46,281	765800	4223-j76600
100+j31.4	19,9 + j41.779	46,279	757600	1540-j757600

Как видно из табл. 5, изменение характера и величины нагрузки в широких пределах практически не оказывает влияния на работу УФК.

Рассмотрен случай, когда повреждение произошло на 50 % длины ЛЭП. Считая линию однородной, представим модель ЛЭП в виде двух П-образных звеньев с одинаковыми параметрами (см. рис. 9). Повреждение моделируется путем подключения переходного сопротивления Z_{III} . В табл. 6 приведены результаты моделирования повреждения при $Z_{III} = 100$ Ом. Как видно из табл. 6, УФК достаточно чувствительно к повреждениям внутри контролируемой ЛЭП.



Таблица 6

Z _{нагр} ,Ом	$Z_1^{ }$,Ом	Z ₀₁ ,кОм	Z ₀₂ ,кОм	Z_1^{\parallel} ,Ом	Z_{01}^{\parallel} ,кОм	Z_{02}^{\parallel} ,кОм
10	j23.162	-j1500	-j1500	j22.2	-j1500	-j1500
100	j23.162	-j1500	-j1500	j18.942	-j1500	-j1500
j31	j23.162	-j1500	-j1500	j22.551	-j1500	-j1500
100+j31	j23.162	-j1500	-j1500	j18.9	-j1500	-j1500

Принцип функционирования УФК, использующего односторонние измерения ММЗ токов и напряжений, рассмотрим на модели ЛЭП в виде пяти Побразных звеньев с одинаковыми параметрами (см. рис. 10). Контроль за состоянием ЛЭП ведем по ее входному сопротивлению:

$$Z_{ex} = \frac{U_1}{I_1} \cdot e^{j\psi_{ex}}, \qquad (28)$$

где ψ_{ex} – РМВНП между входным током I_1 и напряжением U_2 (см. рис. 10). $\downarrow_{i_1(t_j)}$ Z_1 $\downarrow_{i_2(t_j)}$ Z_{i_1} Z_{i_2} Z_1 Z_{i_1} Z_{i_2} Z_{i_1} $Z_{i_2(t_j)}$ $Z_{i_2(t$

Оценка изменения Z_{6x} производится с учетом текущего режима работы ЛЭП, относительно предварительно рассчитанных значений для всех возможных режимов ее работы.

В табл. 7. приведены результаты расчетов для моделируемой ЛЭП при повреждениях в точках 1-5 ($Z_{harp} = 100$ Ом, $Z_{III} = 100$ Ом).

Таблица 7		
Точка КЗ	$Z_{_{\it {\it GX}}}$,Ом	$ Z_{\theta X} $,Om
1	5.052+j7102	8.716
2	9.011+j14.202	16.819
3	12.971+j21301	24.94
4	16.931+j28.401	33.056
5	20.892+j35.5	41.192

Анализ результатов моделирования ЛЭП (табл. 7) позволяет утверждать, что, просматривается возможность организации ФК путем сопоставления значений

Z_{вх} при заведомо исправном состоянии ЛЭП и при повреждениях на ее различных участках.



Рис. 11. Упрощенная Г-образная схема замещения однофазного трансформатора

Рис. 12. Структурная схема модели однофазного трансформатора

Для оценки возможности реализации УФК однофазного трансформатора в программе Matlab исследована Г-образная схема замещения одной фазы трансформатора ТДЦ 200000/110 (см. рис. 11), в которой учитывается нелинейность характеристики намагничивания сердечника. На рис. 11: R_{12} и X_{12} – суммарные активное и индуктивное сопротивления обмоток трансформатора, $u_{H}'(t)$ – вторичное напряжение, приведенное к первичной обмотке. На рис. 12 приведена схема модели.

Как показано в диссертационной работе, контроль состояния обмоток силовых трансформаторов в рабочем режиме удобно проводить по сопротивлению его продольной ветви Z_{12} . U12

Рассматриваем простейший случай – трансформатор имеет коэффициент обмотки: известен трансформации лве трансформатора; с помощью РЭС собраны MM3 токов и напряжений $u_H(t)$, РМВНП $u_{RX}(t)$, $i_{2}(t)$. между напряжениями $u_{BX}(t)$ и $u_H(t)$ может быть рассчитан по одной из рассмотренных в главах 4 и 5 процедур. Тогда напряжение $u_{12}(t)$ найдем из треугольника напряжений (см. рис. 13)



Рисунок 13.

$$U_{12} = \sqrt{U_{BX}^{2} + U_{H}^{'2} - 2U_{BX}U_{H}^{'}\cos(\psi_{U_{BX},U_{H}})},$$

где ψ_{U_{BX},U_H} – РМВНП между напряжениями $u_{BX}(t)$ и $u_H'(t)$.

Сопротивление Z₁₂ рассчитывается очевидным образом:

$$Z_{12} = \sqrt{R_{12}^2 + X_{12}^2} = U_{12} / I_2'.$$
⁽²⁹⁾

В табл. 8 приведены результаты расчетов Z₁₂ для моделируемого трансформатора при различных значениях мощности нагрузки. Таблица 8

Мощность и характер нагрузки, МВА	Z ₁₂ , Ом
30	7,732
60	7,659
150	7,619
200	7,621
Активно-индуктивная 170/30	7,669

Для оценки чувствительности исследуемого УФК к повреждениям внутри трансформатора необходимо изменить сопротивления продольной ветви модели; вычислить с помощью описанных выше процедур новые значения Z_{12} ; сравнить результаты данного расчета со значениями Z_{12} заведомо исправного трансформатора, работающего в этом же режиме. Для примера в табл. 9 приведены результаты расчетов Z_{12} для моделируемого трансформатора при значении сопротивления продольной ветви модели $0,975 Z_{\rm K}$ и различных значениях мощности нагрузки. Там же приведены значения ΔZ_{12} , оценивающие изменение полученного значения сопротивления продольной ветви относительно случая, когда при моделировании было задано полное сопротивление продольной ветви трансформатора (см. табл. 8), работающего в аналогичном режиме.

Таблица 9

Мощность и характер нагрузки, МВА	Z ₁₂ , Ом	ΔZ_{12} ,%
60	7.47	2,467
200	7.431	2,493
Активно-индуктивная 170/30	7.482	2,44

Анализ данных из табл. 9 показывает, что УФК действительно чувствительно к изменениям сопротивлений продольной ветви трансформатора и может быть использовано для контроля состояния его обмоток.

Аналогичные исследования проводились на моделях трехфазных трансформаторов ТДЦ 400000/220 и ТМН 6300/35; показано, что ФК следует производить путем сопоставления значений Z_{12} между собой для каждой фазы. Для обеспечения достоверности результатов при таком подходе следует также оценивать симметричность питающего напряжения и нагрузки трансформатора.

На модели трансформатора ТМН 6300/35 была проведена оценка работоспособности УФК в условиях несинусоидальных токов и напряжений. Результаты исследований показали, что искажение формы токов и напряжений практически не оказывает влияния на функционирование УФК.

Для оценки возможности реализации УФК КУ в программе Matlab была исследована модель трехфазной цепи, содержащей КУ типа БКЭ-1,05-252 (см. рис. 14). На рис. 15 приведена структурная схема модели.

Здесь: Z_A, Z_B, Z_C – эквивалентные сопротивления КУ для фаз A, B и C.



Рис. 14. Схема замещения КУ



Рис 15. Структурная схема модели

С точки зрения ФК, исследуемую КУ удобно представить в виде эквивалентного сопротивления, величина которого учитывает суммарные значения всех единичных элементов с учетом вида их соединения для каждой фазы. ФК удобно проводить по полным сопротивлениям каждой фазы.

Вычисление сопротивлений Z_A, Z_B, Z_C производилось на основе измерений MM3 токов $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ и напряжений $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$:

$$Z_{A} = R_{A} + jX_{A} = \frac{I_{AB}}{U_{AB}}e^{j\psi_{A}}, Z_{B} = R_{B} + jX_{B} = \frac{I_{BC}}{U_{BC}}e^{j\psi_{B}}, Z_{C} = R_{C} + jX_{C} = \frac{I_{AC}}{U_{AC}}e^{j\psi_{C}}$$

где токи I_{AB}, I_{BC}, I_{AC} и напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{AC} находятся известными способами для симметричного режима; ψ_A, ψ_B, ψ_C - РМВНП между соответствующими токами и напряжениями.

В табл. 10 приведены результаты расчетов Z_A, Z_B, Z_C при различных значениях напряжений $U_A = U_B = U_C$.

В табл. 11 приведены результаты расчетов Z_A, Z_B, Z_C при различных значениях сопротивлений нагрузки Z_{HA}, Z_{HB}, Z_{HC} .

Таблица 10)					
Напряжение	Z_A , Ом	$ Z_A $, Ом	<i>Z_B</i> , Ом	$ Z_B $, Ом	<i>Z</i> _{<i>C</i>} , Ом	$ Z_C $, Ом
600	0.205+j101.72	101.77	0.205+j101.72	101.77	0.205+j101.72	101.77
800	0.205+j101.72	101.77	0.205+j101.72	101.77	0.205+j101.72	101.77
1000	0.205+j101.72	101.77	0.205+j101.72	101.77	0.205+j101.72	101.77

Также на описанной выше модели проводилась оценка работоспособности УФК в условиях несинусоидальных токов и напряжений.

Таблица 11

Z_H ,Ом	Z_A , Ом	$ Z_A ,$	Z_B , Ом	$ Z_B ,$	<i>Z_C</i> , Ом	$ Z_C ,$
		Ом		Ом		Ом
100	0.205+j101.72	101.77	0.205+j101.72	101.77	0.205+j101.72	101.77
200	0.205+j101.72	101.77	0.205+j101.72	101.77	0.205+j101.72	101.77

Как показали исследования, значения Z_A, Z_B, Z_C практически не зависят от режима работы КУ; ФК следует производить путем сопоставления значений Z_A, Z_B, Z_C между собой для каждой фазы; искажения токов и напряжений практически не оказывают влияние на функционирование УФК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы известные и предложены новые процедуры определения РМВНП между токами, напряжениями, токами и напряжениями, использующие теорему квазимощности Телледжена; разложение токов (напряжений) в ряд Фурье; линейную и параболическую интерполяцию токов (напряжений);

2. Разработан виртуальный генератор периодических сигналов, с помощью которого можно дать исчерпывающую оценку работоспособности любых методик определения РМВНП;

3. Проведено комплексное исследование влияния параметров анализируемых токов (напряжений) на точность определения РМВНП теми или иными методами. Сравнение рассмотренных процедур определения РМВНП по точности и трудоемкости показало, что наиболее точным является метод, основанный на разложении сигналов в ряд Фурье; наименее трудоемким является метод, основанный на линейной интерполяции токов (напряжений);

4. Исследования на цифро-аналого-физической модели ЭЭС НИИПТ и обработка осциллограмм, полученных в ЭЭС, показали работоспособность предложенных автором вычислительных процедур определения РМВНП;

5. На математических моделях ЛЭП, силовых трансформаторов и конденсаторных устройств компенсации реактивной мощности были показаны принципиальные возможности использования процедур определения РМВНП в устройствах функционального контроля элементов ЭЭС.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Гольдштейн, Е.И., Кац, И.М., Теория и практика диагностирования элементов электроэнергетических систем и сетей по параметрам их схем замещения в рабочем режиме / Н.Л. Бацева, Д.В. Джумик, А.В. Панкратов, А.В. Прохоров, Л.В. Абрамочкина, Т.С. Гурин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. – 2009. – №1. – С. 7 – 10.

2. Гольдштейн, Е.И., Кац, И. М. Определение угла сдвига фаз между двумя несинусоидальными сигналами, представленными цифровыми отсчетами // Известия вузов. Физика. – 2007. – №10. – С. 66–71.

3. Кац, И. М. Определение угла сдвига фаз между двумя несинусоидальными сигналами, представленными цифровыми отсчетами // Обозрение прикладной и промышленной математики. – Т. 14. – Вып. 5. – С. 890 – 891.

4. Пат. 2298200 РФ, МПК 7 G01R31/00. Способ функционального контроля статических и динамических элементов трехфазных электротехнических и электромеханических систем / Е.И. Гольдштейн, И.М. Кац; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2006100794/28; заявлено 10.01.2006; опубл. 27.04.2007, Бюлл.12. – 2 с.

5. Пат 60735 РФ, МПК 7 G01R31/02. Устройство для функционального контроля трехфазных линий электропередач с односторонним питанием / Е.И. Гольдштейн, И.М. Кац; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2006115958/22; заявлено 10.05.2006; опубл. 27.01.2007, Бюлл. 3. – 2 с.

6. Пат. 2303269 РФ, МПК 7 G01R31/02. Способ функционального контроля трехфазных линий электропередач с односторонним питанием / Е.И. Гольдштейн, И.М. Кац; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2006112846128; заявлено 17.04.2006; опубл. 20.07.2007, Бюлл. 20. – 3 с.

7. Пат. 67278 РФ, МПК 7 G01R31/00. Устройство для определения угла сдвига фаз между двумя сигналами / Е.И. Гольдштейн, И.М. Кац; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2007111176/22; заявлено 26.03.2007; опубл. 10.10.2007, Бюлл.28. – 2с.

8. Пат. 2331078 РФ, МПК 7 G01R25/00. Способ определения угла сдвига фаз между двумя сигналами / Е.И. Гольдштейн, И.М. Кац; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2007111016/28; заявлено 26.03.2007; опубл. 10.08.2008. Бюлл. 22. – 3 с.

9. Пат. 54209 РФ, МПК 7 G01R31/00. Устройство для функционального контроля статических и динамических элементов трехфазных электротехнических и электромеханических систем / Е.И. Гольдштейн, И.М. Кац; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2006100398/22; заявлено 10.06.2006; опубл. 10.01.2006. Бюлл.16. – 3 с.

10. Пат. 2338212 РФ, МПК 7 G01R25/00. Способ определения угла сдвига фаз между двумя сигналами, , представленными цифровыми отсчетами / Е.И. Гольдштейн, Т.С. Гурин, И.М. Кац; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2007119732/28; заявлено 28.05.2007; опубл. 10.11.2008. Бюлл. 31. – 2 с.

11. Пат. 2338213 РФ, МПК 7 G01R25/00. Способ определения угла сдвига фаз между двумя сигналами, представленными цифровыми отсчетами / Е.И. Гольдштейн, И.М. Кац; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2007119733/28; заявлено 28.05.2007; опубл. 10.11.2008. Бюлл. 31.– 3 с.

12. Baceva, N. The calculation of the phase shift between current and voltage of the overhead lines by using the Telleggen's quasipower theorem / E. Goldstein, I. Katz // Materials of the 51 International Scientific Colloquium "Faculty of Electrical Engineering and Information Technology". – Ilmenau (Germany): Techinsche Universitat Ilmenau, 2006. – P. 387 – 388.

13. Кац, И. М. Диагностирование технического состояния электрооборудования с помощью регистраторов аварийных событий // Материалы Всероссийской конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». В 2 ч. Ч 1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 25 – 26.

14. Кац, И. М. Функциональный контроль статических и динамических элементов трехфазных электротехнических и электромеханических устройств по массивам мгновенных значений токов и напряжений // Материалы Всероссийского смотра-конкурса студентов вузов «Эврика 2005». В 2 ч. Ч 1. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. – С. 349 – 353.

15. Кац, И. М. Моделирование системы функционального контроля статических и динамических элементов трехфазных электротехнических и электромеханических устройств по массивам мгновенных значений токов и напряжений // Материалы II Международного семинара «Физико-математическое моделирование систем». В 2 ч. Ч 1.: Моделирование Технических систем. Математическое и программное обеспечение систем компьютерного моделирования. – Воронеж: Изд-во Воронежского государственного технического университета, 2005. – С. 23 – 28.

16. Гольдштейн, Е.И., Кац, И.М. Функциональный контроль и диагностирование электроэнергетических систем и их элементов. / Ю.В. Хрущев, О.А. Сулайманов, Н.Л. Бацева, Д.В. Джумик, Е.В. Радаев, А.В. Панкратов // Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками электроэнергии: Материалы Международного научно-технического семинара. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – С. 98 – 108.

17. Кац, И. М. Анализ режимов работы линий электропередач по массивам мгновенных значений токов и напряжений // Труды XII Международной науч-

но-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2005. – Т.1. – С. 43 – 44.

18. Джумик, Д.В., Кац И.М. Программно-аппаратный комплекс (прибор, алгоритмы и программное обеспечение) для функционального обследования элементов ЭЭС / А.В. Панкратов // Труды всероссийской конференции-конкурса инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению программы «Энергетика и энергосбережение». – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – С. 34 – 40.

19. Кац, И. М. Определение на основе теоремы Телледжена угла сдвига фаз между несинусоидальными сигналами, представленными массивами мгновенных значений // XIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». В 3 Т. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – С. 180 – 182.

20. Кац, И. М. Анализ режимов работы линий электропередач по массивам мгновенных значений токов и напряжений // XIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» В 3 Т. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – С. 33 – 35.

21. Кац, И. М. Определение угла сдвига фаз между двумя сигналами, представленными цифровыми отсчетами // Измерение, контроль, информатизация: Материалы 8 международной научно-технической конференции; под ред. О.И. Хомутова, Л.И. Сучковой – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. – С. 18 – 22.

22. Кац, И. М. Определение угла сдвига фаз между двумя несинусоидальными сигналами, представленными цифровыми отсчетами / И.М. Кац // «Измерения в современном мире»: Труды Международной научн. - техн. конф. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – С. 32 – 34. Подписано к печати 3 марта 2008 г. Формат 60х84/16. Бумага ксероксная. Печать RISO. Усл. печ. л. 1. Тираж 120 экз. Заказ № 21. Отпечатано в типографии г. Томск, ул. Усова, 7, оф. 040