

На правах рукописи

Бацева Наталья Ленмировна

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ
ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ
В РАБОЧЕМ РЕЖИМЕ**

Специальность 05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск - 2005

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент Гольдштейн Ефрем Иосифович

**Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Усов Ю. П.**

**кандидат технических наук,
Конарев О.С.**

**Ведущая организация: Омский государственный университет
путей сообщения, г. Омск**

**Защита состоится « 8 » июня 2005 г. в 15:00 часов на заседании
диссертационного совета К 212.269.03 при Томском политехническом
университете по адресу: 634050, г. Томск, улица Усова, 7, ауд. 331.**

**С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского
политехнического университета (634004, г. Томск, ул. Белинского, 53а)**

Автореферат разослан « 26 » апреля 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент _____ Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Однофазные трансформаторы малой мощности (ТММ) широко используются в различных электротехнических установках, разнообразных устройствах для передачи и переработки информации, в различных системах автоматики. Как правило, экспериментальные параметры и характеристики трансформаторов малой мощности определяются с помощью опытов холостого хода и короткого замыкания, требующих выводу трансформатора из рабочего режима. В тоже время из года в год растет интерес к контролю параметров и характеристик трансформаторов малой мощности именно в рабочем режиме.

Так, например, однофазные путевые трансформаторы рельсовых цепей обеспечивают их питание от источника переменного тока и являются важным и ответственным элементом современных систем сигнализации, централизации и блокировки на железнодорожном транспорте. Такие трансформаторы являются напольными устройствами наружного исполнения, подвержены воздействию влаги с агрессивными примесями, пыли и вибрации; помимо этого, они работают круглосуточно в напряженном режиме, а цена их неисправности очень высока. Потери мощности в обмотках и магнитопроводе путевых трансформаторов малой мощности непосредственно влияют на режим работы рельсовой цепи и, главное, на обеспечение нормальной работы ее приемника. Действительно, основная задача рельсовой цепи – контроль исправности железнодорожной колеи и проверка отсутствия на контролируемом участке подвижного состава требует выполнения двух противоречивых условий: при исправной и свободной от подвижного состава рельсовой цепи напряжение на приемнике должно быть достаточным для его стабильной работы; наоборот, при наличии подвижного состава напряжение на приемнике должно стать настолько малым, чтобы заставить приемник это зафиксировать.

Исходя из вышеизложенного, в ряде руководящих материалов департамента сигнализации, централизации и блокировки Российских железных дорог рекомендуется проверять параметры путевых трансформаторов малой мощности в предельных и промежуточных режимах их работы, причем достаточно строго нормируются суммарные активные потери в трансформаторе.

Решение задачи по определению параметров схем замещения трансформаторов в рабочем режиме представляет интерес и для практики технического обслуживания мощных трансформаторных групп, состоящих из однофазных трансформаторов и автотрансформаторов, которые широко используются в энергосистемах России. В этом случае целесообразно иметь достоверную информацию о текущем состоянии объекта

(мониторинг), исключить лишние коммутации высоковольтных трансформаторов и проводить контроль их параметров в рабочем режиме.

Решению сформулированной задачи контроля параметров трансформаторов малой мощности в рабочем режиме способствует появление в нашей стране и за рубежом цифровых измерительных приборов и систем, позволяющих измерить и, главное, записать в память массивы мгновенных значений электрических величин - токов и напряжений. Другими словами, появилась реальная возможность рассмотреть любые физические явления, происходящие в трансформаторах малой мощности с энергетической точки зрения, которая является наиболее общей.

В последние годы широко внедряются новейшие компьютерные системы с богатыми графическими возможностями, которые позволяют легко превратить полученные массивы мгновенных значений токов и напряжений в те или иные геометрические образы, удобные для обозрения и сравнения. В этом плане особого внимания заслуживают вопросы использования массивов мгновенных значений для построения вольт-амперных характеристик (ВАХ) трансформаторов. К сожалению, использованию вольт-амперных характеристик, как одному из способов представления процессов в трансформаторах малой мощности, уделяется незаслуженно малое внимание.

Все вышесказанное делает актуальным рассмотрение комплекса вопросов по совершенствованию математической модели трансформаторов малой мощности, использованию модели при контроле параметров трансформаторов малой мощности в рабочем режиме, созданию новых процедур и программного инструментария, предназначенного для развития методов определения параметров схем замещения трансформаторов в рабочем режиме.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка новых процедур: определения параметров схемы замещения однофазных трансформаторов малой мощности по цифровым массивам мгновенных значений токов и напряжений, измеренным на его входе и выходе; спектрального анализа токов и напряжений в однофазных трансформаторах малой мощности.

Для достижения указанной цели необходимо:

1. Провести анализ известных подходов к определению параметров схемы замещения трансформаторов и спектрального анализа его токов и напряжений, чтобы выявить недостаточно проработанные вопросы и выбрать пути их решения;
2. Исследовать возможность определения параметров схемы замещения однофазных трансформаторов малой мощности в рабочем режиме по массивам мгновенных значений токов и напряжений при минимальном числе экспериментов;

3. Исследовать возможность проведения спектрального анализа токов и напряжений в трансформаторах малой мощности с использованием вольт-амперных характеристик;

4. На основе проведенных исследований разработать программные модули «Расчет спектрального портрета периодического сигнала» и «Расчет параметров схемы замещения трансформаторов малой мощности», обеспечивающих реализацию результатов исследований указанных выше в п.п. 2 и 3.

Методы исследований

Для решения поставленных в настоящей работе задач использовались: теория электрических машин и трансформаторов; методы обработки информации с помощью ПЭВМ; математическое моделирование, вычислительные и физические эксперименты.

Научная новизна и основные результаты, выносимые на защиту

При решении поставленных задач были получены следующие результаты, определяющие научную новизну работы и выносимые на защиту:

- впервые разработана математическая модель однофазного трансформатора малой мощности, позволяющая более точно определить все параметры его схемы замещения (при наличии кроме первичной и вторичной, третьей, свободной от нагрузки, обмотки) в рабочем режиме, используя в качестве исходных данных массивы мгновенных значений напряжения и тока;

- разработана приближенная математическая модель двухобмоточного однофазного трансформатора малой мощности, позволяющая определить с приемлемой точностью параметры его схемы замещения в рабочем режиме, используя в качестве исходных данных массивы мгновенных значений напряжения и тока;

- предложен критерий «грубой» оценки качества работы однофазных трансформаторов малой мощности по коэффициенту искажения геометрии вольт-амперной характеристики;

- разработана и апробирована новая процедура проведения спектрального анализа токов и напряжений, не требующая знания периода сигнала;

- разработана и апробирована новая методика определения сдвига фаз между двумя сигналами, основанная на теореме Телледжена о токах и напряжениях, существующих в цепях с разными условиями питания, разными по составу элементами, но при одной и той же топологии.

Практическая ценность

- представленные в работе точная и приближенная математические модели однофазного трансформатора малой мощности позволяют определить активные и реактивные сопротивления схемы замещения трансформатора без вывода его из рабочего режима, что дает возможность

систематически контролировать стабильность режима его работы, а по отклонениям сопротивлений от нормы делать вывод о возможной неисправности трансформатора или о неполадках в цепи, где он включен;

- предложенная процедура спектрального анализа обеспечивает идентификацию и привязку параметров схемы замещения конкретного трансформатора к качеству питающего напряжения и к несинусоидальности токов в обмотках и магнитопроводе;

В целом полученные результаты исследований представляют интерес для практики технического обслуживания любых электрических цепей с однофазными трансформаторами, когда невозможны или нежелательны отключения их для регулярного контроля параметров.

Апробация

Основные результаты проведенных исследований обсуждались на научных семинарах кафедры «Электрические станции» Томского политехнического университета и на следующих конференциях:

- Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления» (г. Томск, 2002 г.);
- Третья межотраслевая научно-практическая конференция «Автоматизация и прогрессивные технологии» (г. Новоуральск, 2002 г.);
- Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика. Электротехнические системы и комплексы» (г. Томск, 2003 г.);
- Международная конференция «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы» (г. Екатеринбург, 2003 г.);
- Сорок восьмой интернациональный научный коллоквиум (г. Ильменау, Германия, 2003 г.);
- Третий международный семинар «Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах» (г. Воронеж, 2004 г.).

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано семь печатных работ, включая монографию (в соавторстве), получено 6 патентов РФ.

Реализация результатов работы

Основные результаты работы используются при разработке и совершенствовании методик контроля параметров схемы замещения однофазных трансформаторов малой мощности в институте «Гипротранс-сигналсвязь» ОАО «РЖД» (г. Санкт-Петербург) в виде методик, алгоритмов и программного модуля «Расчет параметров схемы замещения трансформаторов малой мощности».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 122 страницах машинописного текста, содержит 60

рисунков, 38 таблиц. Список литературы включает 105 наименований. Приложение содержит акт о внедрении результатов диссертационной работы, краткую информацию о приборах для получения мгновенных значений токов и напряжений, инструкцию по работе с программными модулями, технические характеристики трансформаторов ОСО-0,25 и ПОБС-5М, протоколы электрических испытаний трансформаторов ОСО-0,25 и ПОБС-5М и занимает 18 страниц.

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

В первой главе приводятся общие сведения об однофазных ТММ и рассматриваются наиболее часто встречающиеся виды схем замещения трансформаторов. На основе анализа известных схем замещения показано преимущество Т-образной схемы, в которой в явном виде учтена нелинейность сопротивлений поперечной ветви трансформатора. Обсуждаются трудности проведения опытов холостого хода и короткого замыкания, применительно к задаче определения основных параметров трансформаторов: вывод трансформатора из рабочего режима; необходимость в дополнительном оборудовании; пренебрежение потерями мощности в продольной ветви схемы замещения в опыте холостого хода и в поперечной ветви – в опыте короткого замыкания. Проанализирована возможность определения параметров схемы замещения по массивам мгновенных значений токов и напряжений, что позволит получить более достоверную информацию о физических процессах, протекающих в трансформаторах. В этом случае активную (среднюю за период) мощность наиболее просто определить по (1)

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k(t_j) \cdot u_k(t_j), \quad (1)$$

где N - число отсчетов на периоде сигналов тока и напряжения; $i_k(t_j)$, $u_k(t_j)$ - мгновенные значения тока и напряжения.

Проведенный анализ литературных источников показал, что единый подход к определению реактивной мощности отсутствует, но было обращено внимание на теорию профессора О.А. Маевского: с одной стороны - при частотном преобразовании реактивной мощности, имеющем место в любой нелинейной цепи переменного тока, нет эквивалентности между реактивными мощностями различных частот

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} k_{np} Q_k, \quad (2)$$

где $Q_k = U_k I_k \sin \varphi_k$; k_{np} - коэффициент приведения частоты k -той гармоники к основной частоте, с другой стороны - при несинусоидальном периодическом токе (напряжении) реактивная мощность нелинейного элемента (трансформатор является нелинейным элементом!)

пропорциональна площади его циклической вольт-амперной характеристики (см. рис. 2), описываемой в течение периода повторяемости

$$Q = \pm \frac{1}{2\pi} \oint u di = \pm \frac{1}{2\pi} |F_{BAH}|, \quad (3)$$

где F_{BAH} - площадь петли циклической ВАХ $u = f(i)$, описываемой в течение периода переменного тока.

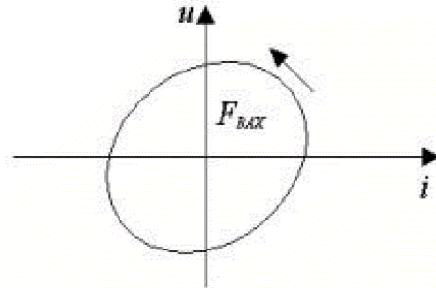


Рис. 2 - Циклическая вольт-амперная характеристика

В формуле (3) знак «плюс» используется в том случае, если рабочая точка перемещается по ВАХ против хода часовой стрелки, знак «минус» - если рабочая точка перемещается по ходу часовой стрелки.

Однако из указанных работ неясно: как наилучшим образом определить площадь ВАХ; какова природа реактивной мощности (сдвига, искажения или полная реактивная); какова область применения данного подхода.

В первой главе также обсуждаются трудности построения векторной диаграммы по экспериментальным данным. При построении векторной диаграммы требуется знать углы – между током и своим напряжением; между током в одной ветви схемы замещения и током в ее другой ветви; между напряжениями в разных ветвях схемы замещения. В ходе поисков путей определения сдвига фаз между любыми сигналами (не обязательно синусоидальными!) было обращено внимание на теорему Б.Д.Х. Телледжена (Теллегена), которая применима к токам и напряжениям, существующим в цепях с разными условиями питания, разными по составу элементами или же с разными начальными условиями, но при одной и той же топологии.

$$\sum_p \dot{i}_p u_p'' = \sum_a \dot{i}_a u_a'', \quad (4)$$

где \dot{i}_p, \dot{i}_a - токи, подчиняющиеся первому закону Кирхгофа, но не обязательно соответствующие любой системе действующих токов в сети; u_p'', u_a'' - напряжения, подчиняющиеся второму закону Кирхгофа, но в общем случае не соответствующие какой-либо системе токов, которые подчиняются первому закону Кирхгофа. По этой причине токи \dot{i}_p, \dot{i}_a и напряжения u_p'', u_a'' могут пониматься как «виртуальные» токи и напряжения.

В данной главе также показана необходимость в получении спектрального портрета сигналов, заданных массивами мгновенных значений. Был проведен анализ научно-технической литературы, рассмотрены факторы, затрудняющие проведение спектрального анализа и намечены пути создания процедуры спектрального анализа на основе использования ВАХ.

Вышеизложенное позволило сформулировать основные задачи исследований:

1. Выбрать математическую модель, удобную для определения реактивной мощности, исследовать влияние шага дискретизации на величину площади вольт-амперной характеристики и реактивной мощности, проверить работоспособность разработанных процедур при различных сигналах.
2. Разработать процедуру спектрального анализа с помощью вольт-амперных характеристик и на ее основе создать и протестировать программный модуль «Расчет спектрального портрета периодического сигнала».
3. Провести экспериментальные исследования ряда образцов однофазных трансформаторов малой мощности в режимах холостого хода и номинальной нагрузки.
4. Разработать математические модели и с их помощью - алгоритмы определения параметров схемы замещения однофазных трансформаторов малой мощности по экспериментальным данным.
5. На основе исследований п.п. 3 и 4 разработать программный модуль «Расчет параметров схемы замещения трансформатора».

Во второй главе рассматривалось определение площади ВАХ и реактивной мощности, если исходные данные представлены в виде массивов мгновенных значений. Считая вольт-амперную характеристику многоугольником, с вершинами $(i(t_j), u(t_j), j = 1, 2, \dots, N)$, предлагается вычислять ее площадь по формуле для многоугольника с вершинами, заданными координатами концов отрезков

$$F_{ВАХ} = \frac{I}{2} \sum_{j=1}^N (u(t_j) - u(t_{j+1})) (i(t_j) + i(t_{j+1})), \quad (5)$$

Окончательно из (3) и (5) получено

$$Q = \pm \frac{I}{4\pi} \sum_{j=1}^N [u(t_j) - u(t_{j+1})] \cdot [i(t_j) + i(t_{j+1})]. \quad (6)$$

Исследовалось влияние шага дискретизации на величину площади вольт-амперной характеристики и реактивной мощности (см. рис. 3). Имеются вполне определенные число отсчетов $N_0 = 200$ и шаг дискретизации $\Delta t_0 = 10^{-4}$ с, при которых дальнейшее увеличение числа отсчетов на периоде и уменьшение шага дискретизации практически не влияют на результаты расчетов площади вольт-амперной характеристик и реактивной мощности.

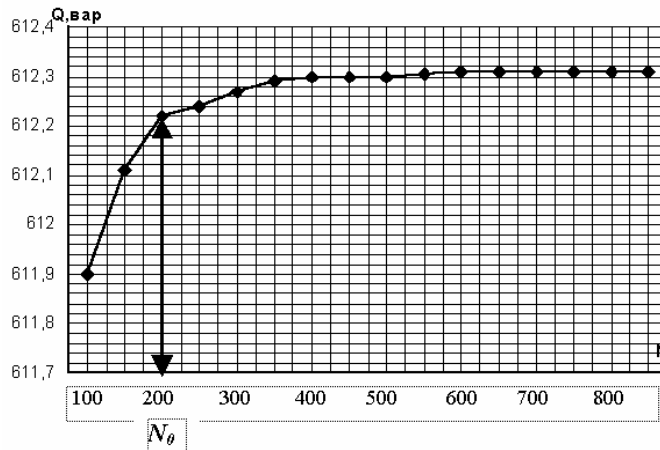


Рис. 3 - Влияние числа разбиений на результаты определения величины площади ВАХ и реактивной мощности

Для того, чтобы выявить механизм расчета реактивной мощности по ВАХ, был проанализирован пример

$$\begin{aligned}
 u(t)_{\Sigma} &= u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) + u_4(t) + u_5(t); \quad i(t)_{\Sigma} = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) + i_4(t) + i_5(t); \\
 u_1(t) &= 320 \sin(\omega t - 8^\circ); \quad u_2(t) = 65 \sin(2\omega t - 53^\circ); \quad u_3(t) = 42 \sin(3\omega t + 66^\circ); \\
 u_4(t) &= 27 \sin(4\omega t - 25^\circ); \quad u_5(t) = 14 \sin(5\omega t - 40^\circ); \\
 i_1(t) &= 7,553 \sin(\omega t + 13,339^\circ); \quad i_2(t) = 2,232 \sin(2\omega t - 6,856^\circ); \quad i_3(t) = 2,605 \sin(3\omega t + 111,734^\circ); \\
 i_4(t) &= 2,422 \sin(4\omega t + 13,852^\circ); \quad i_5(t) = 1,71 \sin(5\omega t - 20,578^\circ).
 \end{aligned} \tag{7}$$

В таблице 1 приведены результаты расчета по (6). Здесь же, для сравнения, приведены результаты расчета реактивной мощности по формулам Международной электротехнической комиссии (МЭК) и (2).

Таблица 1 – Результаты расчета реактивной мощности для примера (7)

Условия вычислительного эксперимента	Q , вар по (6)	$Q_{\text{МЭК}} = \sum_{k=1}^N U_k I_k \sin \varphi_k$, вар	Q , вар по (2)	
			k	Значение
1. $u_1(t_j)$ и $i_1(t_j)$	439,676	439,748	$k=1$	439,75
2. $u_2(t_j)$ и $i_2(t_j)$	104,546	52,307	$k=2$	104,61
3. $u_3(t_j)$ и $i_3(t_j)$	117,35	39,174	$k=3$	117,52
4. $u_4(t_j)$ и $i_4(t_j)$	81,829	20,511	$k=4$	82,04
5. $u_5(t_j)$ и $i_5(t_j)$	19,820	3,98	$k=5$	19,9
6. $u_1(t_j)$ и $i_3(t_j)$	$3,68 \cdot 10^{-6}$	-	-	-
7. $u_2(t_j)$ и $i_4(t_j)$	$4,5 \cdot 10^{-15}$	-	-	-
8. $u_1(t_j)$ и $i_5(t_j)$	$3,49 \cdot 10^{-6}$	-	-	-
Q_{Σ}	763,221	555,72	-	762,82

Анализ результатов исследований показывает хорошую работоспособность предложенной формулы (6) и справедливость формулы (2), то есть при определении реактивной мощности в цепи с нелинейными элементами суммирование реактивных мощностей от взаимодействия гармоник тока и

напряжения одинаковой частоты должно вестись с учетом коэффициента приведения к основной частоте. Реактивная мощность от взаимодействия тока и напряжения разных частот близка к нулю, поэтому формула (6) позволяет рассчитать реактивную мощность сдвига.

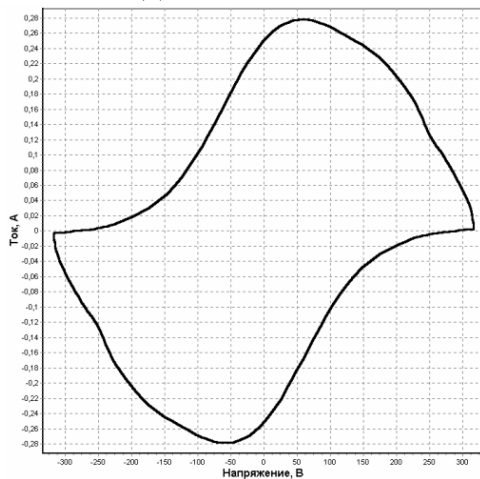
В главе показана возможность судить об особенностях функционирования однофазных ТММ по коэффициенту геометрической формы ВАХ – « ρ », найденному по формуле

$$\rho = \frac{P_{ВАХ}}{\sqrt{F_{ВАХ}}}, \quad (8)$$

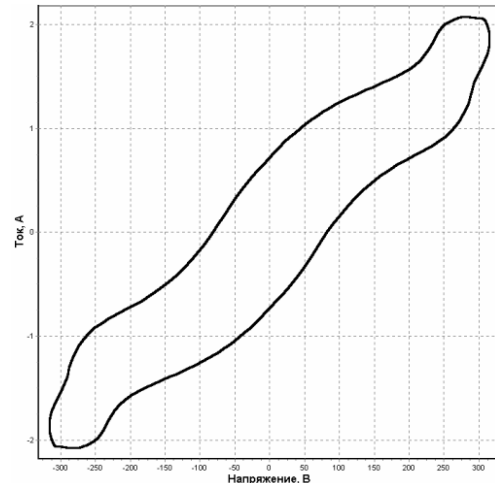
где $P_{ВАХ}$ - периметр ВАХ.

Формула (8) была проверена на ряде тестовых примеров, подобранных таким образом, чтобы ВАХ давала окружность или эллипс (геометрические фигуры, периметр которых можно определить по общеизвестным формулам). Затем формулу (8) применили к реальным массивам мгновенных значений, полученных для трансформаторов.

В качестве примера на рис. 4 представлены ВАХ и коэффициенты геометрической формы для трансформатора ПОбС-5М в режимах холостого хода и номинальной нагрузки.



а) режим холостого хода,
 $\rho_{xx} = 95,35$



б) режим номинальной нагрузки,
 $\rho_{нн} = 49,62$

Рис. 4 – Вольт-амперные характеристики для трансформатора ПОбС-5М

Легко видеть, что чем ρ больше, тем менее нагружен трансформатор.

Третья глава посвящена разработке процедуры спектрального анализа токов и напряжений. Для определения спектрального портрета (частота, фаза, амплитуда) тока (напряжения) используются выявленные при исследованиях ВАХ два их свойства: реактивная мощность определяется взаимодействием лишь одинаковых по частоте гармоник тока и напряжения; площадь ВАХ и реактивная мощность при разных по частоте сигналах тока и напряжения практически равна нулю.

Идея предлагаемой процедуры проиллюстрирована на рис. 5, где $a(t_j)_\Sigma$ - исследуемый многочастотный периодический сигнал; $b_0(t_j)$ - опорный одночастотный сигнал

$$a(t_j)_\Sigma = \sum_{k=1}^{\infty} A_{mk} \sin(\omega_k t_j + \varphi_k); b_0(t_j) = B_m \sin(\omega_0 t_j + \varphi_0); B_m = const; \omega_0 = var; \varphi_0 = var. \quad (9)$$

ППАВ – программа построения ВАХ, обеспечивающая вычисление ее площади и соответствующей реактивной мощности; нахождение спектра (частоты, фазы и амплитуды анализируемого сигнала); контроль «замкнутости» и «разомкнутости» ВАХ.

Механизм нахождения частоты и фазы сигнала поясним на тестовом примере

$$u(t_j) = 320 \sin \omega t_j; i(t_j) = 7,654 \sin(\omega t_j - 30^\circ); \omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50; \Delta t = 10^{-4} c; N = 200. \quad (10)$$

Допустим, использован опорный сигнал

$$b_{mU}(t_j) = B_{mk} \sin(\omega_0 t_j + \varphi_0), B_{mk} = 100. \quad (11)$$

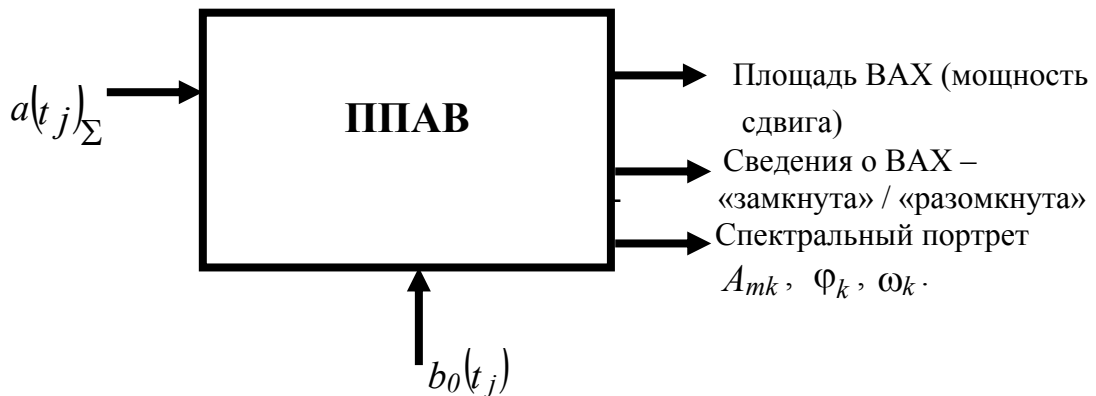


Рис. 5 - Структурная модель процедуры спектрального анализа

Если изменять частоту в диапазоне в диапазоне 49 Гц – 51 Гц с шагом 1 Гц, а фазу φ_0 брать равной 0, 120, 180 и 240 градусов, то вывод о присутствии или отсутствии в анализируемом сигнале составляющей с частотой $f_0 = f_k$ или $\omega_0 = \omega_k$ делается по результатам анализа двух условий:

1) для разности ΔF :

$$\Delta F = b_1 - b_N, \quad (12)$$

где b_1 - первое значение массива опорного сигнала (при $t = 0$); b_N - последнее значение массива опорного сигнала. Если $\Delta F \approx 0$, то ВАХ замкнута, если $\Delta F \neq 0$, то – разомкнута.

2) для площади ВАХ $F_{ВАХ\min}$: если одновременно $\Delta F \approx 0$ и $F_{ВАХ\min} \approx 0$, то $\omega_0 = \omega_k$, $\varphi_0 = \varphi_k$ (частота и фаза найдены!). Результаты расчетов для примера (10) приведены в табл. 3.

Таблица 3 – «Механизм» поиска частоты и фазы для примера (10)

$f_0, \text{Гц}$ $\omega_0, \text{с}^{-1}$	$\varphi_0, \text{град}$	ΔF	$F_{ВАХ\min}$
1	2	3	4
$f_0 = 49 \text{Гц}$ $\omega_0 = 307,808 \text{с}^{-1}$	0	12,53	6243,51
	120	-6,95	82820,69
	180	-12,53	-6243,51
	240	-5,58	-89064,2
$f_0 = 50 \text{Гц}$ $\omega_0 = 314,159 \text{с}^{-1}$	0	$8,2 * 10^{-8}$	$6,21 * 10^{-12}$
	120	$4,1 * 10^{-8}$	87048,05
	180	$8,2 * 10^{-8}$	$4,1 * 10^{-5}$
	240	$4,1 * 10^{-8}$	-87048
$f_0 = 51 \text{Гц}$ $\omega_0 = 320,442 \text{с}^{-1}$	0	12,53	6369,63
	120	5,58	90863,25
	180	12,53	6369,628
	240	6,95	84493,6

Анализ результатов, представленных в табл. 3 позволяет утверждать, когда одновременно $\Delta F \cong 0$ и $F_{ВАХ\min} \cong 0$, то по параметрам соответствующего опорного сигнала можно найти сведения о k -той частотной составляющей анализируемого сигнала (в нашем случае: $f_k = f_0 = 50 \text{Гц}$; $\omega_k = \omega_0 = 314,1592654 \text{с}^{-1}$; $\varphi_k^u = \varphi_0 = 0^\circ = 180^\circ$. Аналогично для тока было получено при $\Delta F \cong 0$ и $F_{ВАХ} \cong 0$: $f_k = f_0 = 50 \text{Гц}$; $\omega_k = \omega_0 = 314,1592654 \text{с}^{-1}$; $\varphi_k^i = \varphi_0 = -30^\circ$.

Для определения амплитудных значений напряжения и тока сигналов (10) используется сдвиг фаз на 90° , (при котором площадь вольт-амперной характеристики максимальна!)

$$\left(\varphi_k^u\right)' = \varphi_k^u \pm 90^\circ; \left(\varphi_k^i\right)' = \varphi_k^i \pm 90^\circ. \quad (13)$$

Для этих углов и рассчитываются A_{mk}^u и A_{mk}^i

$$A_{mk} = \frac{2Q_{M\max}}{k_{np} B_{mk}}, \quad (14)$$

где $k_{np} = \omega_k / \omega_1 = f_k / f_1$.

В нашем случае получено $F_{вах\max}^u = 100514,4$; $Q_{M\max}^u = 15997,364$; $A_{mk}^u = 319,95$; $F_{вах\max}^i = 240,418$; $Q_{M\max}^i = 38,265$; $A_{mk}^i = 7,653$.

Для проверки чувствительности предложенной процедуры спектрального анализа был исследован трехчастотный сигнал

$$a(t_j) = A_{m1} \sin \omega_1 t_j + A_{m2} \sin(2\omega_1 t_j + \varphi_2) + A_{m3} \sin(3\omega_1 t_j - \varphi_3) = \quad (15)$$

$$= 100 \sin \omega_1 t_j + 10 \sin(2\omega_1 t_j + 30^\circ) + 100 \sin(3\omega_1 t_j - 30^\circ)$$

Здесь $A_{m1} = A_{m3} = 100 = \text{const}$; $A_{m2} = \text{var}$ ($A_{m2} = 10; 5; 1; 0,2; 0,04; 0,008$). Для каждого случая рассчитывалась относительная погрешность в определении амплитуды A_{m2} по формуле

$$\delta_a \% = \frac{A_{mk \text{ зад}} - A_{mk \text{ выч}}}{A_{mk \text{ зад}}} \cdot 100\% . \quad (16)$$

Результаты исследования при $K_A = \frac{A_{m1}}{A_{m2}} = \frac{A_{m3}}{A_{m2}}$ отражены на рис. 6.

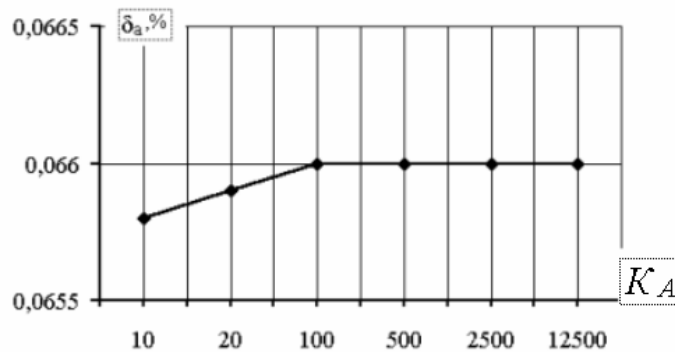


Рис. 6 - Зависимость относительной погрешности от отношения амплитуд

Из рис. 6 видно, что процедура обладает достаточной чувствительностью к малым амплитудам, даже когда в сигнале, помимо составляющих с малыми амплитудами, присутствуют и составляющие с амплитудой в несколько десятков раз превышающие малую.

Предложенная процедура спектрального анализа была проверена на ряде сложных тестовых сигналов и прошла апробацию на экспериментальных данных для однофазных трансформаторов малой мощности (см. ниже). При этом использовался разработанный программный модуль «Расчет спектрального портрета периодического сигнала». Везде погрешность вычислений находилась в пределах 0,016-0,4%.

Четвертая глава посвящена разработке математической модели однофазного трехобмоточного трансформатора малой мощности при наличии третьей обмотки, свободной от нагрузки и упрощенной модели однофазного двухобмоточного трансформатора малой мощности по экспериментальным данным, полученным с помощью регистратора «Автономный измерительный модуль БИМ 1140». Схема экспериментальных исследований приведена на рис. 7.

Исследовались два однофазных трансформатора малой мощности – ОСО-0,25 (пример узкоспециализированного трансформатора для стабильной сети питания при неизменной нагрузке) и ПОБС-5М-0,3 (пример многофункционального трансформатора для нестабильной питающей сети при разнообразной по характеру и назначению нагрузке).

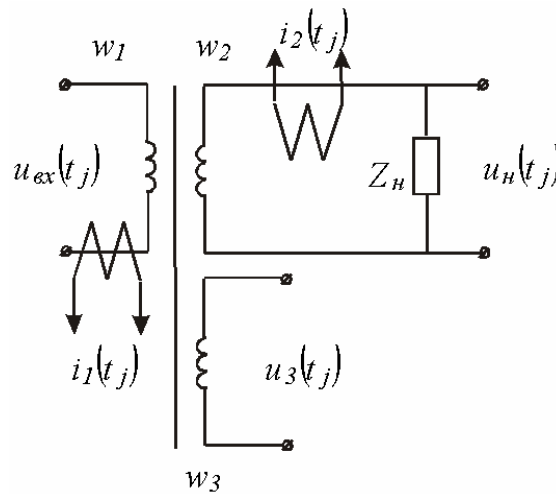


Рис. 7 - Схема экспериментальных исследований ТММ

Основное внимание уделялось исследованиям ТММ в нагрузочном режиме. Для трансформатора с третьей, свободной от нагрузки обмоткой, схема замещения приведена на рис. 8.

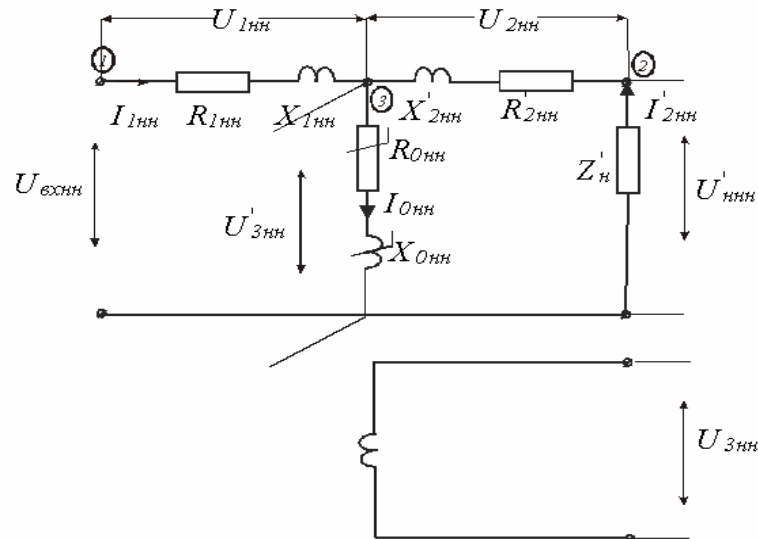


Рис. 8 - Схема замещения трансформатора ПОБС-5М

По массивам токов и напряжений был проведен спектральный анализ для режимов холостого хода (**хх**) и номинальной нагрузки (**нн**), по результатам которого построены спектральные характеристики токов холостого хода и тока намагничивания (в относительных единицах) на рис. 9.



а) режим нагрузки

б) режим холостого хода

Рис. 9 - Спектральная характеристика тока намагничивания (а) и тока холостого хода (б) для трансформатора ПОБС-5М

Ток намагничивания определялся по формуле (17) при приведенном к первичной цепи токе $i_{2нн}(t_j)$

$$i_{0нн}(t_j) = i_{1нн}(t_j) - i'_{2нн}(t_j); \quad i'_{2нн}(t_j) = i_{2нн}(t_j) \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right). \quad (17)$$

При известных экспериментальных данных $\|u_{вхнн}(t_j)\|$, $\|i_{1нн}(t_j)\|$, $\|i_{2нн}(t_j)\|$, $\|u_{ннн}(t_j)\|$ и $\|u_{3нн}(t_j)\|$ разработана следующая процедура определения параметров схемы замещения:

1. Все экспериментальные данные приводятся к обмотке w_1 ;
2. Рассчитываются мгновенные значения: тока $i_{0нн}(t_j)$ по (17); напряжений $u_{1нн}(t_j)$ и $u'_{2нн}(t_j)$ по (18);

$$u_{1нн}(t_j) = u_{вхнн}(t_j) - u_{0нн}(t_j); \quad u'_{2нн}(t_j) = u_{0нн}(t_j) - u'_{ннн}(t_j); \quad (18)$$

3. Далее по известным массивам токов и напряжений определяются активные и реактивные мощности соответствующих ветвей схемы замещения

$$P_{1нн} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_{1нн}(t_j); \quad p_{1нн}(t_j) = u_{1нн}(t_j) \cdot i_{1нн}(t_j); \quad (19)$$

$$Q_{1нн} = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N [u_{1нн}(t_j) - u_{1нн}(t_{j+1})] \cdot [i_{1нн}(t_j) + i_{1нн}(t_{j+1})].$$

Аналогичные формулы можно записать и для $P'_{2нн}$ и $Q'_{2нн}$;

$$P_{0нн} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_{0нн}(t_j); \quad p_{0нн}(t_j) = u_{0нн}(t_j) \cdot i_{0нн}(t_j); \quad (20)$$

$$Q_{0нн} = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N [u_{0нн}(t_j) - u_{0нн}(t_{j+1})] \cdot [i_{0нн}(t_j) + i_{0нн}(t_{j+1})];$$

4. Для каждой из ветвей схемы замещения активные и реактивные сопротивления находятся по формулам (21), если предварительно рассчитаны действующие значения соответствующих токов по (22)

$$R_n = P_n / I_n^2; \quad X_n = Q_n / I_n^2, \quad (21)$$

$$A_\partial = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a_n^2(t_j) \right]^{0,5}. \quad (22)$$

где n – номер ветви схемы замещения (1, 2' или 0).

По описанной выше процедуре были проведены расчеты для трансформатора ПОБС-5М (см. табл. 5).

Таблица 5 – Результаты расчетов параметров схемы замещения для ПОБС-5М

$U_{вх}, В$	$R_{1нн}, Ом$	$X_{1нн}, Ом$	$R_{2нн}, Ом$	$X_{2нн}, Ом$	$R_{0нн}, Ом$	$X_{0нн}, Ом$
91,7	2,5	1,531	0,158	0,008	1977,4	2373,5
112,33	2,57	1,416	0,157	0,005	1728	2424,3
133,83	2,54	1,296	0,157	0,004	1495,2	2373,5

Легко видеть, что разработанная процедура нахождения параметров многообмоточного трансформатора ПОБС-5М достаточно строга, так как массив значений $\|u_{3нн}(t_j)\|$ однозначно описывает процессы в магнитопроводе трансформатора, а процессы в продольных ветвях схемы замещения точно описываются напряжениями $\|u_{1нн}(t_j)\|$ и $\|u'_{2нн}(t_j)\|$.

На рис. 10 приведен фрагмент векторной диаграммы рассматриваемого трансформатора.

Из рис. 9 видно, что ток намагничивания имеет несинусоидальный характер (амплитуда третьей гармоники составляет 50% от амплитуды первой), поэтому для построения векторной диаграммы его необходимо было привести к эквивалентному синусоидальному току. Для выполнения этой процедуры в качестве опорного сигнала был выбран массив входного напряжения $\|u_{вхнн}(t_j)\|$, действующее значение для эквивалентной синусоиды тока намагничивания рассчитано по формуле (22) и для него найдена амплитуда эквивалентной синусоиды ($I_{0ннэ} = \sqrt{2} \cdot I_{0нн}$), а углы между массивами мгновенных значений тока намагничивания и входного напряжения вычислялись с помощью теоремы Теллеждена о квазимощности. Для двух массивов мгновенных значений $\|a(t_j)\|$ и $\|b(t_j)\|$ активная и реактивная квазимощности определялись по формулам

$$P_{AB}^* = \frac{I}{N} \sum_{j=1}^N a(t_j) \cdot b(t_j); \quad (23)$$

$$Q_{AB}^* = \frac{I}{4\pi} \sum_{j=1}^N [a(t_j) - a(t_{j+1})] \cdot [b(t_j) + b(t_{j+1})].$$

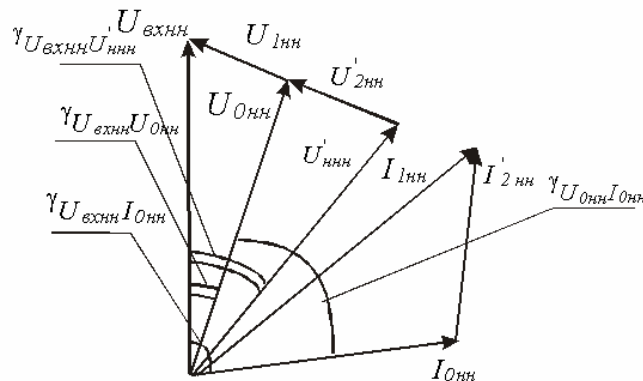


Рис. 10 - Фрагмент векторной диаграммы токов и напряжений ПОБС-5М

Если A и B – действующие значения массивов токов (напряжений), то сдвиг фаз между соответствующими векторами определится по формулам:

$$\varphi = \arccos \left(\frac{\overset{*}{P}_{AB}}{A \cdot B} \right); \quad \varphi = \arcsin \left(\frac{\overset{*}{Q}_{AB}}{A \cdot B} \right); \quad \varphi = \arctg \left(\frac{\overset{*}{Q}_{AB}}{\overset{*}{P}_{AB}} \right). \quad (24)$$

Экспериментальные исследования показали работоспособность всех трех способов определения сдвигов фаз, однако, исходя из точности, для дальнейшего использования был выбран последний способ.

В упрощенной модели однофазного двухобмоточного трансформатора малой мощности (когда напряжение $U_{0нн}$ экспериментально найти невозможно!) на основе дополнительных исследований использованы приближенные формулы (см. рис. 10):

$$\gamma_{U_{вхнн}U_{0нн}} \cong 0,5 \gamma_{U_{вхнн}U'_{ннн}}, \quad U_{0нн} \cong 0,5 (U_{вхнн} + U'_{ннн}). \quad (24)$$

Исходными данными в данном случае являются массивы напряжений $\|u_{вхнн}(t_j)\|$, $\|u'_{ннн}(t_j)\|$ и массивы тока $\|i_{1нн}(t_j)\|$, $\|i'_{2нн}(t_j)\|$. По значениям напряжений на входе и выходе трансформатора определяется сдвиг фаз между ними, затем напряжение $U_{0нн}$, действующее значение тока намагничивания $I_{0нн}$, сдвиг фаз $\gamma_{U_{0нн}I_{0нн}}$, сопротивления $R_{1нн}$, $X_{1нн}$, $R_{2нн}$, $X_{2нн}$, $R_{0нн}$, $X_{0нн}$. Результаты расчетов представлены в табл. 6.

Таблица 6 – Результаты расчетов параметров схемы замещения для ОСО-0,25

$U_{вх}$, В	$R_{1нн}$, Ом	$X_{1нн}$, Ом	$R_{2нн}$, Ом	$X_{2нн}$, Ом	$R_{0нн}$, Ом	$X_{0нн}$, Ом
221,9	4,44	1,58	0,0168	0,006	37,71	588,55

Кроме описанных выше, в четвертой главе рассмотрены также вопросы определения параметров ветви намагничивания ТММ по результатам опыта холостого хода (см. табл. 7).

Таблица 7 – Результаты расчетов режима холостого хода

Марка ТММ	$U_{вхх}$, В	$R_{0хх}$, Ом	$X_{0хх}$, Ом
ОСО-0,25	223	39,5	548,726
ПОБС-5М	89,6	1844,428	2409,652
	112,33	1773,098	2526,932
	133,3	1470,901	2389,52

По данным из табл. 5, 6 и 7, можно сделать вывод, о том, что разработанные математические модели позволяют определить параметры

схем замещения трех- и двухобмоточных трансформаторов малой мощности без вывода их из рабочего режима.

Достоверность полученных результатов подтверждена опытами, проведенными с помощью моста постоянного тока Р333. Относительная погрешность в определении активного сопротивления первичной обмотки составила 1,75%, вторичной – 1,9%.

Заключение

Обобщая выводы, изложенные в отдельных главах, отметим основные результаты работы.

1. Разработана точная математическая модель однофазного трехобмоточного трансформатора малой мощности, позволяющая строго определить все параметры его схемы замещения (при наличии кроме первичной и вторичной, третьей, свободной от нагрузки, обмотки) в рабочем режиме.

2. Разработана приближенная математическая модель двухобмоточного однофазного трансформатора малой мощности, позволяющая определить с приемлемой точностью параметры его схемы замещения в рабочем режиме.

3. Разработана новая процедура спектрального анализа токов и напряжений, использующая выявленный в ходе исследований механизм построения вольт-амперной характеристики. Показана высокая чувствительность разработанной процедуры спектрального анализа.

4. Показана возможность учета особенностей функционирования однофазных трансформаторов малой мощности с помощью коэффициента геометрической формы вольт-амперной характеристики.

5. Предложены новые способы определения сдвига фаз между напряжениями и токами, заданными массивами мгновенных значений токов и напряжений.

6. Выявлена природа реактивной мощности, определяемой с помощью вольт-амперной характеристики – это реактивная мощность сдвига, обусловленная одинаковыми по частоте гармониками тока и напряжения, причем суммирование гармоник тока и напряжения отдельных частот ведется с учетом коэффициента приведения частоты k -той гармоники к частоте первой гармоники.

7. В ходе исследований вольт-амперных характеристик для одночастотных и многочастотных сигналов, предложена математическая модель для вычисления реактивной мощности при известных мгновенных значениях тока и напряжения. Проведена оценка влияния шага дискретизации сигнала на величину площади вольт-амперной характеристики и реактивной мощности, даны рекомендации по выбору шага дискретизации.

8. Разработаны программные модули «Расчет спектрального портрета периодического сигнала» и «Расчет параметров схемы замещения трансформаторов», что позволяет использовать предложенные

математические модели для совершенствования методов контроля параметров схемы замещения однофазных трансформаторов малой мощности.

Основные положения диссертации и научные результаты отражены в следующих работах:

1. *Бацева Н.Л.* Определение мощности сдвига и спектральный анализ с помощью вольт-амперных характеристик // Докл. международной научн.-техн. конф. «Электроэнергетика, Электротехнические комплексы и системы» (Томск, 3 – 5 сент. 2003 г.). – Томск: ТПУ, 2003. – С.145-149.
2. *Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О., Бацева Н.Л.* Использование циклической вольт-амперной характеристики при экспериментальных исследованиях электротехнических устройств и систем // Докл. Всероссийской научн.-практ. конф. Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления (Томск, 2 – 4 окт.2002 г.). – Томск:Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2002. – С. 42-44.
3. *Гольдштейн Е.И., Бацева Н.Л.* Циклическая вольт-амперная характеристика двухполюсника как источник информации о процессах, описываемых цифровыми массивами мгновенных значений токов и напряжений // Докл. III Межотраслевой научн.-техн. конф. Автоматизация и прогрессивные технологии (Новоуральск, 11-13 нояб. 2002 г.). – Новоуральск: НГТИ, 2002. – С. 35-39.
4. *Гольдштейн Е.И., Бацева Н.Л., Панкратов А.В.* Технический контроль параметров схем замещения трансформаторов по результатам их измерений в режимах холостого хода и номинальной нагрузки // Докл. междунар. конф. «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы» (Екатеринбург, 20-23 марта, 2003 г.). – Екатеринбург:ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. – Ч.1. – С. 398-401.
5. *Гольдштейн Е.И., Бацева Н.Л., Панкратов А.В.* Вычислительные процедуры определения основных параметров и характеристик однофазных трансформаторов малой мощности в рабочем режиме// Материалы третьего международного семинара «Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах» (Воронеж, 22-24 апреля, 2004 г.). – Воронеж:ВГТУ, 2004.– С. 213-216.
6. Пат. 2229725 РФ МПК7 G 01 R 23/16. Способ спектрального анализа периодического многочастотного сигнала / Е.И. Гольдштейн, Н.Л. Бацева. – Заявлено 12.11.2002; Оpubл. 27.05.2004. Бюлл. № 15.
7. Пат. 2231799 РФ МПК7 G 01 R 27/02. Способ определения параметров Т-образной схемы замещения двухобмоточного низкочастотного трансформатора в режиме холостого хода / Е.И. Гольдштейн, Н.Л. Бацева. – Заявлено 10.12.2002; Оpubл. 10.03.2004. Бюлл. № 18.

8. Пат. 39408 РФ МПК7 G 01 R 25/00. Устройство для измерения сдвига фаз между двумя синусоидальными сигналами / Е.И. Гольдштейн, А.О. Сулайманов, Н.Л. Бацева, А.В. Панкратов. – Заявлено 31.03.2004; Опубл. 27.07.2004. Бюлл. № 21.
9. Пат. 39407 РФ МПК7 G 01 R 25/00. Устройство для измерения сдвига фаз между двумя синусоидальными сигналами / Е.И. Гольдштейн, А.О. Сулайманов, Н.Л. Бацева, А.В. Панкратов. – Заявлено 31.03.2004; Опубл. 27.07.2004. Бюлл. № 21.
10. Функциональный контроль и диагностика электротехнических и электромеханических систем и устройств по цифровым отсчетам мгновенных значений тока и напряжения/ В.С. Аврамчук, Н.Л. Бацева, Е.И. Гольдштейн, И.Н. Исаченко, Д.В. Ли, А.О. Сулайманов, И.В. Цапко // Под ред. Е.И. Гольдштейна. – Томск: Печатная мануфактура, 2003. – 240 с.
11. Бацева Н.Л., Климов О.Ю. Исследование формулы для определения площади вольт-амперной характеристики при расчете реактивной мощности, потребляемой электротехническими устройствами// Докл. IX молодежной НПК студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 7-11 апреля, 2003 г.). – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – Том 1. – С. 301-303.
12. *Goldshtein E., Batseva N., Sulaimanov A., Valov B.* Ein Berechnungsverfahren von Lastcharakteristika durch Momentanwerte von Stroumen und Spannungen // Tagungsband 48. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (Ilmenau, 22-25 sept. 2003). – Ilmenau: Technische Universitaet Ilmenau, 2003.- p. 575-576.
Перевод: Е.И. Гольдштейн, Н.Л. Бацева, А.О. Сулайманов, Б.М. Валов. Использование массивов мгновенных значений тока и напряжения при расчете мощностей нагрузок // Сборник тезисов докладов 48-го Международного научного коллоквиума (Ильменау, 22-25 сентября, 2003). – Ильменау: Технический университет Ильменау, 2003. – с. 575-576.

Подписано к печати 19 апреля 2005 г. Формат 60x84/16.

Бумага ксероксная. Печать RISO. Усл. печ. л. 1.

Тираж 100 экз. Заказ № .

Отпечатано в типографии

Лицензия

г. Томск, ул. Усова, 7, оф.