

На правах рукописи

Панкратов Алексей Владимирович

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ
ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ МОНИТОРИНГА
СОСТОЯНИЯ ИХ АКТИВНЫХ ЧАСТЕЙ

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск 2009

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент Гольдштейн Е.И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Обрусник В.П.

кандидат технических наук Целебровский И.В.

Ведущая организация:

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

Защита состоится «6» мая 2009 г. в 15 часов на заседании совета Д212.269.11 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д.7, ауд. 217.

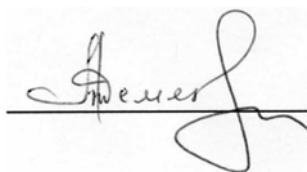
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета (634004, г. Томск, ул. Белинского 53а).

Автореферат разослан «02» апреля 2009 г.

Ученый секретарь совета Д212.269.11

по защите докторских и кандидатских диссертаций,

кандидат технических наук



Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

В последние годы обострилась задача обеспечения надежной эксплуатации силовых трансформаторов. Это связано с ростом количества трансформаторов, выработавших свой нормативный срок эксплуатации, и снижением размеров финансирования ремонтных и испытательных работ. В большинстве случаев перебои в электроснабжении потребителей вызваны внезапными повреждениями трансформаторного оборудования, при которых ремонт или замена поврежденного трансформатора являются затратными (как по времени, так и по финансовым расходам) мероприятиями.

В то же время, существующие методы испытаний и диагностирования силовых трансформаторов, не позволяют достоверно выделить трансформаторы, в которых появление дефекта наиболее вероятно. Поэтому графики ремонтов силовых трансформаторов составляются не по результатам определения их текущего состояния, а по сроку службы.

Кроме того, внезапные отказы, вызванные быстроразвивающимися дефектами, наносят значительный ущерб трансформатору, так как релейная защита от внутренних повреждений реагирует лишь на наличие короткого замыкания или выделение газов вследствие горения дуги в баке трансформатора, и не позволяет предотвратить повреждение на ранней стадии развития дефекта.

Современный уровень науки и техники дает возможность решить указанные проблемы путем организации мониторинга состояния активной части трансформаторов, то есть непрерывного контроля параметров, позволяющих напрямую или косвенно судить о состоянии контролируемого трансформатора.

Обзор известных разработок по мониторингу состояния трансформаторов показал, что возможности использования для этой цели параметров схемы замещения, определяемых в рабочем режиме по массивам мгновенных значений токов и напряжений, используются незаслуженно мало. К тому же, метод определения параметров схемы замещения трансформатора в рабочем режиме, используется только для трехобмоточного трансформатора, одна из обмоток которого ненагружена. Ряд источников информации указывает на взаимосвязь между внутренними повреждениями и параметрами схемы замещения трансформатора, что создает возможность контроля состояния активных частей трансформаторов по этим параметрам, однако конкретные алгоритмы организации непрерывного контроля параметров схемы замещения в литературе не описаны.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работой является исследование однофазных трансформаторов с позиции организации мониторинга состояния их активных частей по параметрам схемы замещения. Объектом исследования выбраны именно однофазные трансформаторы, так как рассмотрение трехфазных трансформаторов невозможно без предварительного исследования однофазных.

Ожидаемые результаты исследований: разработка методов определения параметров схем замещения различных типов однофазных трансформаторов в рабочем режиме; рекомендации по организации мониторинга состояния активных частей однофазных трансформаторов с использованием предложенных методов.

Научная новизна

При решении поставленной задачи были получены следующие результаты, определяющие научную новизну работы:

1. Предложен новый метод определения магнитных потерь однофазного трансформатора в рабочем режиме по площади «масштабированной» петли гистерезиса.

2. Предложен новый метод определения параметров схемы замещения многообмоточного однофазного трансформатора с любым количеством вторичных обмоток в рабочем режиме при наличии одной ненагруженной обмотки.

3. Предложена новая методика определения параметров схемы замещения однофазного двухобмоточного и трехобмоточного трансформатора в рабочем режиме, при нагруженных вторичных обмотках.

Практическая ценность работы

- Результаты работы расширяют возможности анализа состояния однофазных трансформаторов в рабочем режиме за счет того, что позволяют непрерывно контролировать параметры его схемы замещения. Они могут быть использованы при построении разнообразных систем мониторинга состояния активных частей силовых трансформаторов.

- Непрерывный контроль параметров схемы замещения позволит заблаговременно отключать трансформатор при появлении дефекта, не доводя до его перехода в короткое замыкание или дугу в баке трансформатора, что существенно сократит расходы на последующий ремонт трансформатора. Заблаговременное получение информации о появлении дефекта в трансформаторе дает оперативному персоналу возможность избежать перерыва в электроснабжении потребителей при выводе поврежденного трансформатора в ремонт.

- Внедрение систем мониторинга состояния трансформаторов позволит осуществлять вывод в ремонт в первую очередь трансформаторов с наиболее высокой степенью износа и уйти от графика ремонтов, составленного «вслепую», по сроку службы трансформаторов.

Апробация работы

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

- Девятая международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск – 2003 г.);

- Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск – 2003 г.);
- Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск – 2004 г.);
- Третий международный семинар «Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах» (г. Воронеж - 2004 г.);
- Всероссийский смотр-конкурс студентов ВУЗов «Эврика 2005» (г. Новочеркасск – 2005 г.);
- Второй международный семинар. «Физико-математическое моделирование систем» (г. Воронеж – 2005 г.);
- Пятьдесят первый интернациональный научный коллоквиум (г. Ильменау, Германия – 2006 г.).
- Всероссийская конференция-конкурс инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению Программы «Энергетика и энергосбережение» (г. Томск – 2006г.).
- Открытый конкурс ОАО «Мосэнерго» на лучшие дипломные и курсовые работы студентов ВУЗов России (г. Москва – 2006 г.).
- Международный научно-технический семинар «Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками электроэнергии» (г. Томск – 2006г.);

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 27 печатных работ, из них: 6 патентов РФ на изобретения; 10 патентов РФ на полезную модель; 2 статьи, одна из которых в издании по списку ВАК; 9 тезисов докладов.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы были рассмотрены и положительно оценены на технических совещаниях Томского предприятия филиала ОАО «ФСК ЕЭС» - «МЭС-Сибири» и Филиала ОАО «МРСК Сибири» - «Омскэнерго», где прошли производственные испытания.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и шести приложений, содержит 111 страниц основного текста, список литературы – из 97 наименований, 57 иллюстраций, 20 таблиц. Общий объем работы составляет 127 страниц.

Личный вклад автора

Из 27 работ 5 работ написаны автором единолично; проведение экспериментов по 16 патентам производилось лично автором.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе дано описание конструкции и основных видов повреждений трансформаторов. Приведен сравнительный анализ

существующих методов диагностирования силовых трансформаторов в рабочем режиме, сделан вывод о незаслуженно малом внимании, уделяемом электромагнитным параметрам при организации мониторинга состояния силовых трансформаторов.

На основе анализа литературы составлена таблица 1, отражающая взаимосвязь между дефектами и электромагнитными параметрами трансформатора.

Таблица 1. Связь между дефектами трансформатора и его параметрами

Дефект	Изменение параметра
Межвитковое замыкание	Уменьшение R_1 , X_1 , R_2 и X_2
Деформация обмоток после КЗ	Увеличение L_1 , L_2
Ухудшение контактных соединений	Увеличение R_1 , R_2
Замкнутый контур в магнитопроводе	Увеличение P_0 , Q_0
Изменение свойств ферромагнитного материала	Изменение R_0 , X_0
Процессы нагрева, выделения газов, разрушения изоляции и т.п.	Увеличение P_0 , P_1 , P_2

Рассмотрены различные виды схем замещения трансформаторов, сделан выбор в пользу применения Т- и Г-образных схем замещения (см. рис. 1 и 2).

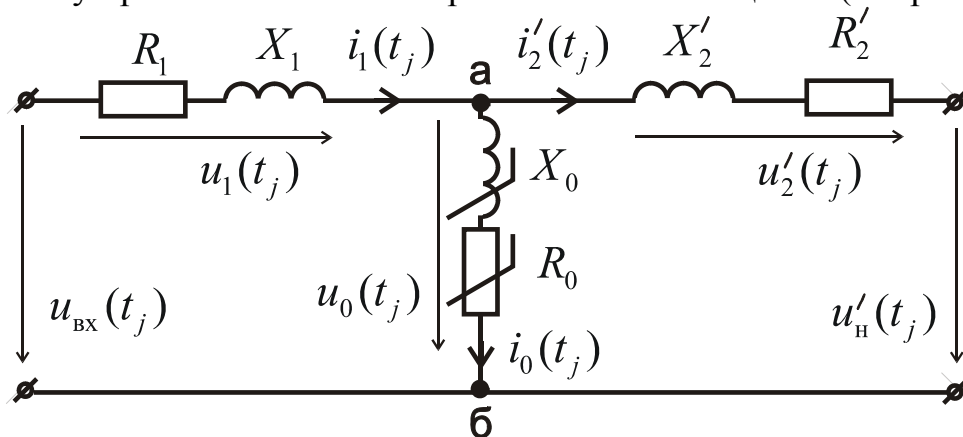


Рис. 1. Т-образная схема замещения однофазного трансформатора

R_1 – активное сопротивление провода первичной обмотки;

X_1 – индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки;

X_0 – индуктивное сопротивление намагничивания;

R_0 – сопротивление, учитывающее магнитные потери.

$R_2' = K_T^2 \cdot R_2$ – приведенное активное сопротивление вторичной обмотки;

$X_2' = K_T^2 \cdot X_2$ – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки;

где $K_T = \frac{w_1}{w_2}$ – коэффициент трансформации трансформатора.

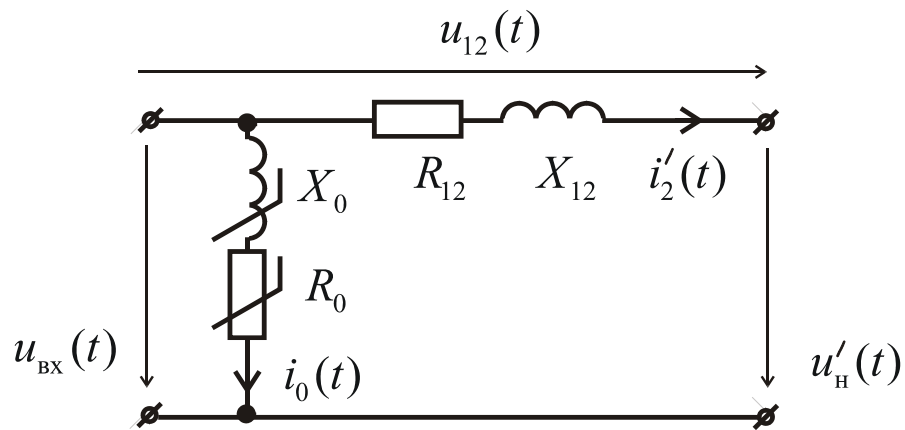


Рис. 2. Г-образная схема замещения однофазного трансформатора

Приведен обзор известных методов определения параметров схем замещения однофазных трансформаторов и сделан вывод об актуальности использования для данной цели массивов мгновенных значений токов и напряжений.

Отмечен ряд недостатков известных методов определения параметров схем замещения однофазных трансформаторов в рабочем режиме:

- Строгое решение получено только для трансформатора, имеющего ненагруженную обмотку;
- Не рассмотрены случаи, когда трансформатор имеет более чем две обмотки;
- Не используются возможности повышения точности за счет проведения расчетов параметров схем замещения трансформаторов несколькими методами;
- Не рассматривается возможность определения индуктивностей и активных сопротивлений непосредственно по массивам мгновенных значений токов и напряжений;
- Недостаточно рассмотрены возможности определения магнитных потерь в трансформаторе и построения его характеристики намагничивания по результатам измерений в рабочем режиме.

Сформулирована цель работы: развитие методов определения параметров схем замещения однофазных трансформаторов и рассмотрение возможности их использования применительно к задаче мониторинга состояния силовых однофазных трансформаторов. Под мониторингом при этом понимается непрерывный контроль параметров схемы замещения трансформатора, рассчитываемых по результатам измерения токов и напряжений непосредственно в рабочем режиме.

В связи с тем, что традиционные методы не позволяют определять параметры схемы замещения трансформаторов в рабочем режиме, паспортные данные трансформатора не могут быть использованы для оценки погрешности разрабатываемых методов. При этом диагностической ценностью будут обладать не абсолютные значения контролируемых параметров, а их изменение относительно параметров, полученных ранее на том же самом трансформаторе тем же самым методом. Таким образом, собственная погрешность метода не имеет принципиального значения.

В качестве объекта исследования выбраны однофазные трансформаторы, так как решение ряда вопросов определения параметров схемы замещения однофазного трансформатора представляет известные трудности. Исследования однофазных трансформаторов послужат подготовительным этапом, «базой» для перехода к решению аналогичных вопросов по трехфазным трансформаторам.

Во второй главе описаны разработанные автором методики определения параметров продольных ветвей схемы замещения однофазного трансформатора в рабочем режиме.

Для трансформатора, имеющего ненагруженную обмотку (рис. 3), использована Т-образная схема замещения.

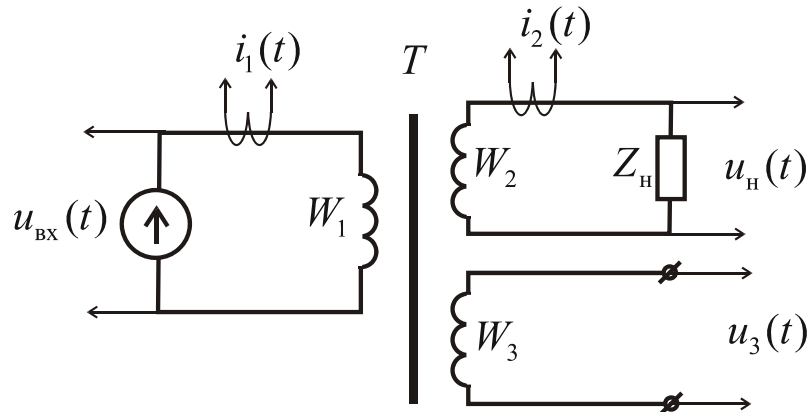


Рис. 3. Схема измерения рабочего режима трансформатора, имеющего ненагруженную обмотку

Для трансформатора, не имеющего ненагруженной обмотки (рис. 4), использована Г-образная схема замещения.

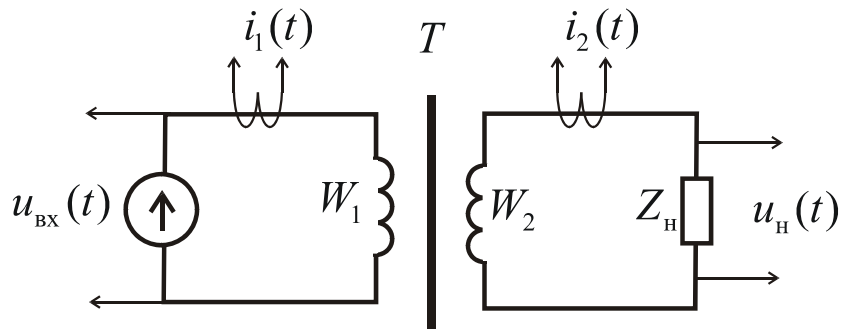


Рис. 4. Схема измерения рабочего режима трансформатора, не имеющего ненагруженной обмотки

Описаны предложенные автором методики определения параметров продольных ветвей методом характерных точек и методом решения систем разностных уравнений. Данные методики опробованы на маломощном трансформаторе, произведено сопоставление полученных результатов с известной методикой определения параметров продольных ветвей методом мощностей.

Метод характерных точек

Так как сопротивления продольных ветвей схемы замещения трансформатора линейны, то справедливо известное соотношение для падения

напряжения в цепи RL (дифференциальное уравнение цепи с постоянными параметрами):

$$u_1(t_j) = R_1 \cdot i_1(t_j) + L_1 \frac{di_1}{dt}(t_j). \quad (1)$$

В этом уравнении два неизвестных: R_1 и L_1 . Уравнение записано для момента времени t_j , поэтому мы имеем N таких уравнений на периоде. Так как для определения параметров R_1 и L_1 достаточно решить систему всего лишь из двух таких уравнений, то выбираем моменты времени, при которых это сделать проще всего. А именно, для определения индуктивности L_1 решим уравнение (1) для моментов времени $t_{1,1}$ и $t_{1,2}$, когда $i_1(t_j) = 0$, при этом уравнение (1) переходит в уравнение (2).

$$L_1 = u_1(t_1) / \frac{di_1}{dt}(t_1); \quad (2)$$

Для определения сопротивления R_1 решим уравнение (1) для моментов времени $t_{2,1}$ и $t_{2,2}$, когда $\frac{di_1}{dt}(t_j) = 0$, при этом уравнение (1) переходит в уравнение (3).

$$R_1 = u_1(t_2) / i_1(t_2); \quad (3)$$

Метод решения системы разностных уравнений сводится к решению системы уравнений типа

$$u_1(t_1) = R_1 \cdot i_1(t_1) + L_1 \frac{di_1}{dt}(t_1); \quad u_1(t_2) = R_1 \cdot i_1(t_2) + L_1 \frac{di_1}{dt}(t_2); \quad (4)$$

записанной для двух моментов времени, выбираемых через заданные промежутки.

Результаты определения параметров Т- и Г-образной схем замещения маломощного трансформатора различными методами приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры схемы замещения маломощного трансформатора

Опыт НН1	Т-образная СЗ				Г-образная СЗ	
	R_1 , Ом	R'_2 , Ом	$(R_1 + R'_2)$ Ом	$(X_1 + X'_2)$ Ом	R_{12} , Ом	X_{12} , Ом
Метод мощностей	2,52	5,92	8,443	1,15	8,54	1,11
Метод характерных точек	2,53	5,92	8,451	1,15	8,31	1,41
Метод решения системы разностных уравнений	2,52	5,92	8,447	1,13	8,55	1,09

В третьей главе описаны разработанные автором методики определения параметров ветви намагничивания схемы замещения однофазного трансформатора в рабочем режиме.

Магнитные потери трансформатора могут быть определены двояко.

Первый способ заключается в следующем. Имея массивы мгновенных значений тока намагничивания $|i_0(t_j)|$ и напряжения намагничивания $|u_0(t_j)|$, по формуле (5) сразу рассчитываем мощность магнитных потерь:

$$P_0^I = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [i_0(t_j) \cdot u_0(t_j)]. \quad (5)$$

Второй способ определения мощности магнитных потерь использует известный факт, что потери в магнитопроводе пропорциональны площади динамической петли магнитного гистерезиса F_M . И так как ток $i_0(t)$ с некоторыми допущениями пропорционален напряженности магнитного поля в магнитопроводе, а $\int u_0'(t)dt$ – его индукции, то зависимость $\int u_0'(t)dt = f(i_0)$ представляет собой масштабированную петлю гистерезиса. Её площадь, отнесенная к периоду, равна потерям в магнитопроводе в единицу времени, то есть мощности потерь:

$$P_0^{II} = F_M / T.$$

При этом индукция в магнитопроводе рассчитывается численным интегрированием массива $|u_0(t_j)|$.

Площадь F_M находится как площадь многоугольника, заданного координатами его вершин

$$F_M = 0,5 \sum_{j=1}^N [i_0(t_j) - i_0(t_{j+1})] \cdot [\int u_0'(t_j)dt + \int u_0'(t_{j+1})dt].$$

Динамическая петля гистерезиса является характеристикой намагничивания трансформатора для данного конкретного режима работы и поэтому представляет особую ценность для оценки состояния магнитной системы трансформатора. Ниже на примере маломощного трансформатора мы рассмотрим несколько таких характеристик, полученных непосредственно в рабочем режиме трансформатора.

Активное сопротивление ветви намагничивания трансформатора легко может быть определено при известной мощности магнитных потерь по формуле:

$$R_0 = P_0 / (I_0)^2,$$

где I_0 - действующее значение тока намагничивания (см. рис. 1).

Намагничивающая мощность Q_0 может быть определена по площади вольтамперной характеристики $u_0 = f(i_0)$:

$$Q_0 = \frac{1}{2\pi} F_{BAX}; \quad F_{BAX} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N [i_0(t_{j+1}) - i_0(t_j)] \cdot [u_0'(t_{j+1}) + u_0'(t_j)].$$

Тогда индуктивное сопротивление ветви намагничивания определяют по формуле:

$$X_0 = Q_0 / (I_0)^2.$$

Схема замещения многообмоточного трансформатора

Особенностью многообмоточного трансформатора является наличие нескольких вторичных обмоток. Это приводит к тому, что в схеме замещения многообмоточного трансформатора появляются несколько вторичных цепей, включенных параллельно (см. рис. 5).

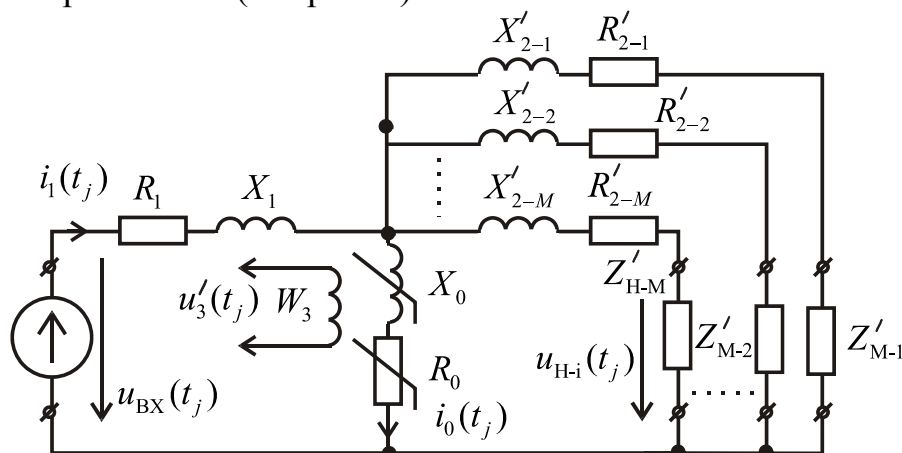


Рис. 5. Т-образная схема замещению многообмоточного трансформатора

Частным случаем многообмоточного трансформатора является трехобмоточный трансформатор. Вопрос определения параметров трехобмоточного трансформатора заслуживает особого внимания в связи с тем, что значительная часть силовых трансформаторов, эксплуатируемых в энергетике, является трехобмоточными. Схема замещения одной фазы трехфазного трансформатора приведена на рис. 6. Здесь учтен известный факт, что обмотка, находящаяся посередине двух других обмоток может иметь нулевое или даже отрицательное значение индуктивного сопротивления рассеяния. Принимая также во внимания тот факт, что в силовых трансформатора активное сопротивление обмоток пренебрежимо мало по сравнению с индуктивным, можно считать, что собственное сопротивление обмотки среднего напряжения (СН), которая, как правило, находится между обмотками НН и ВН, в схеме замещения трехобмоточного трансформатора мало и может быть принято равным нулю.

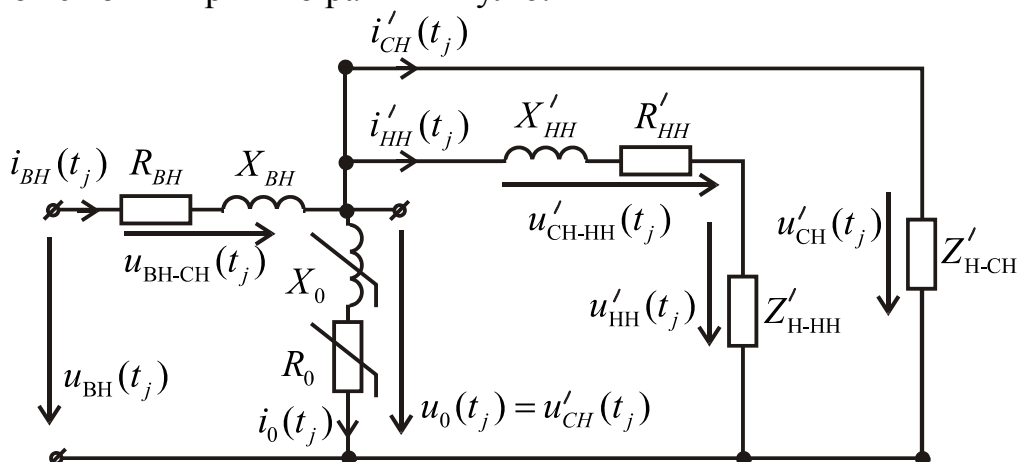


Рис. 6. Схема замещения трехобмоточного трансформатора

Тогда напряжение обмотки СН будет равно напряжению на ветви намагничивания U_0 , что позволяет нам рассчитать все напряжения в схеме замещения трансформатора.

Результаты определения параметров ветви намагничивания однофазного маломощного трансформатора различными методами приведены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры намагничивания маломощного трансформатора

№ Опыта	НН1	НН3	НН4	НН5	НН8
$U_{BX}, В$	89,1	133,3	182,7	217,6	256,5
$P_0^I, Вт$	1,47	2,983	5,395	7,218	8,901
$P_0^{II}, Вт$	1,455	2,957	5,345	7,161	8,846
$R_0^I, Ом$	1906,395	1584,652	928,868	468,223	158,401
$R_0^{II}, Ом$	1886,6	1570,535	920,359	464,581	157,412
$Q_0, вар$	1,855	4,617	11,626	23,544	52,832
$X_0, Ом$	2406,7	2452,2	2001,8	1527,4	940,2

На графике рис. 7 приведено семейство масштабированных динамических петель гистерезиса для опытов нагрузочного режима при различных значениях входного напряжения для маломощного трансформатора, имеющего третью обмотку.

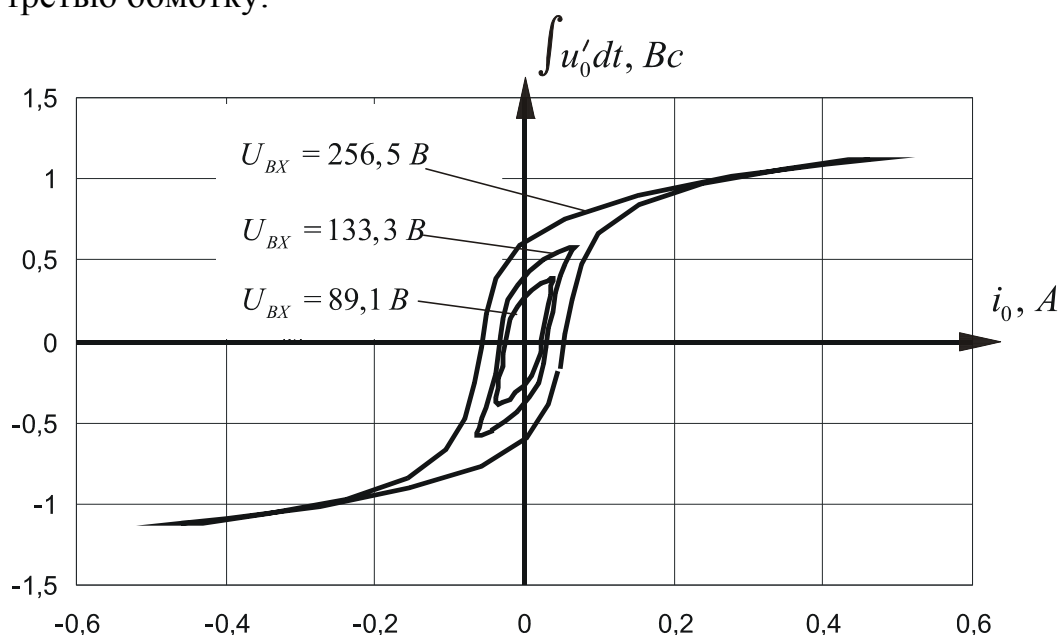


Рис. 7. Динамические характеристики намагничивания для Т-образной СЗ

На рис. 8 приведено семейство вольтамперных характеристик для опытов нагрузочного режима при различных значениях входного напряжения для маломощного трансформатора.

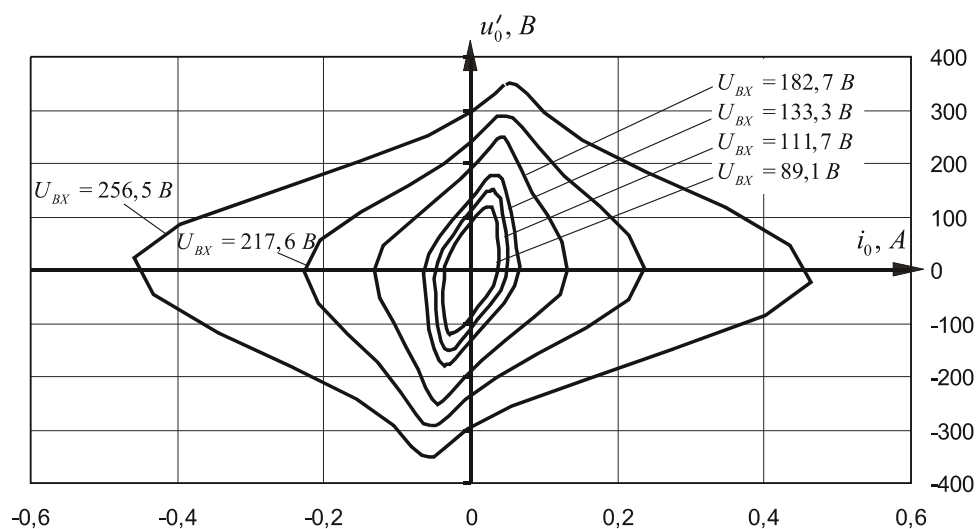


Рис. 8. Вольтамперные характеристики для ветви намагничивания Т-образной СЗ

В четвертой главе диссертации описаны результаты испытаний предложенных методик на однофазном трансформаторе цифро-аналого-физического комплекса ОАО «НИИПТ» и на силовом трансформаторе ТДТН-63000/110/35/10 ПС «Восточная» Томской энергосистемы, а также рассмотрены вопросы организации мониторинга состояния активных частей трансформаторов различных типов.

Результаты измерения массивов мгновенных значений токов и напряжений и паспортные данные опытов холостого хода и короткого замыкания трансформатора были предоставлены автору ОАО «НИИПТ» в рамках договора на проведение исследований. В таблице 4 приведены полученные при расчетах параметры схемы замещения однофазного трансформатора ОАО «НИИПТ».

Таблица 4. Результаты определения схемы замещения однофазного трансформатора ОАО «НИИПТ»

Входное напр.		200 В			100 В		
N		40	80	160	40	80	160
Действующие значения напряжений и токов							
$U_{ВХ}$	В	214.6	215.2	215.2	107.2	106.9	107.3
$U_{ВЫХ}$	В	207.5	208	208.1	103.6	103.2	103.8
U_0	В	209.8	210.4	210.3	104.8	104.5	104.9
I_1	А	2.804	2.813	2.81	1.399	1.398	1.402
I_2	А	2.69	2.7	2.696	1.345	1.344	1.347
I_0	А	0.1678	0.1667	0.1672	0.086	0.0857	0.0861
$U_1=U_{ВХ}-U_0$	В	4.802	4.79	4.853	2.4	2.424	2.435
$U_2=U_0-U_{ВЫХ}$	В	2.298	2.486	2.203	1.19	1.235	1.136
Мощности							
$P_{ВХ}$	Вт	62.948	62.731	62.256	16.147	16.137	16.167
$P_{ВЫХ}$	Вт	34.721	34.504	34.183	8.465	8.431	8.519
P_0	Вт	26.802	26.677	26.599	7.359	7.287	7.272
P_1	Вт	0.46	0.498	0.57	0.082	0.164	0.162
P_2	Вт	0.965	1.052	0.904	0.241	0.254	0.213
$Q_{ВХ}$	вар	596.285	601.491	601.319	148.542	148.378	149.617

Q _{ВЫХ}	вар	554.967	559.799	559.283	138.541	138.637	139.487
Q ₀	вар	21.85	21.629	22.565	5.098	4.744	5.234
Q ₁	вар	13.408	13.454	13.627	3.335	3.374	3.396
Q ₂	вар	6.061	6.61	5.844	1.568	1.624	1.5
Сопротивления							
R ₁	Ом	0.058	0.063	0.072	0.042	0.084	0.083
R ₂	Ом	0.133	0.144	0.124	0.133	0.141	0.118
R ₀	Ом	951.653	960.191	951.258	995.729	993.261	980.95
X ₁	Ом	1.705	1.7	1.726	1.703	1.726	1.727
X ₂	Ом	0.837	0.907	0.804	0.867	0.899	0.827
X ₀	Ом	775.827	778.489	806.983	689.789	646.583	706.103

В таблице 5 для сопоставления, приведены параметры схемы замещения трансформатора, рассчитанные по паспортным данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

Таблица 5. Параметры схемы замещения трансформатора НИИ ПТ по паспортным данным опытов ХХ и КЗ

R ₁	Ом	0,3	X ₁	Ом	5
R ₂	Ом	0,25	X ₂	Ом	3,2
R ₀	Ом	1029	X ₀	Ом	886

Сопоставление данных, представленных в таблице 4, с параметрами из таблицы 5 показывает значительную погрешность определения параметров продольных ветвей R₁, R₂, X₁, X₂ по массивам мгновенных значений токов и напряжений. В то же время погрешность определения параметров ветви намагничивания R₀ и X₀ не столь значительна.

При определении параметров схемы замещения трансформатора ТДТН-63000/110/35/10 ПС Восточная были получены похожие результаты. В таблице 6 приведены данные для ветви намагничивания; при расчете параметров продольных ветвей были получены результаты, значительно отличающиеся от паспортных и заводских данных.

Таблица 6. Параметры намагничивания трансформатора ПС Восточная

	$I_0 = I_{xx} \% \cdot I_{ном},$ А	$P_0 = 1/3 \cdot P_{xx},$ кВт	Q ₀ , квар	R ₀ , Ом	X ₀ , Ом
Заводские испытания	1,71	25	110,7	8550	37858
Данные расчетов	1,62	38,79	96	14769	36466

Значительное отличие полученных результатов от паспортных данных объясняется принципиальным отличием предложенных методик от традиционных, а также высокой результирующей погрешностью. Одной из основных составляющих погрешности при этом является погрешность трансформаторов тока и напряжения. Тем не менее, явным преимуществом предложенных методик перед традиционными является возможность их применения на работающем трансформаторе без отключения его от сети. Это, в свою очередь, позволяет говорить о возможности организации непрерывного контроля состояния активной части трансформатора по указанным параметрам.

Как уже указывалось в первой главе, снижение погрешности методик при этом достигается за счет сравнения контролируемого параметра со значением, полученным ранее на том же самом трансформаторе тем же самым методом.

Сказанное выше иллюстрирует таблица 7, в которой приведены параметры схемы замещения трансформатора ПС Восточная, определенные через равные промежутки времени 0,02 с.

Таблица 7. Изменение параметров трансформатора ПС «Восточная»

t, c	0	0,02	0,04	0,06
$P_1, кВт$	6,21	6,22	6,25	5,80
$P_2, кВт$	10,74	10,94	11,60	11,58
$Q_1, квар$	41	42	43	46
$Q_2, квар$	145	145	144	142
$R_1, Ом$	0,94	0,94	0,94	0,87
$R_2, Ом$	3,43	3,50	3,71	3,70
$X_1, Ом$	6,17	6,28	6,39	6,92
$X_2, Ом$	46,45	46,35	46,01	45,32

Таким образом, при одном и том же режиме работы и отсутствии развивающихся дефектов в трансформаторе контролируемые параметры схемы замещения трансформатора остаются практически неизменными во времени, а при появлении дефекта следует ожидать заметного изменения одного из контролируемых параметров в соответствии с таблицей 1.

Предложена структурная схема программно-аппаратного комплекса (ПАК) для мониторинга состояния активной части трансформатора, приведенная на рис. 9.

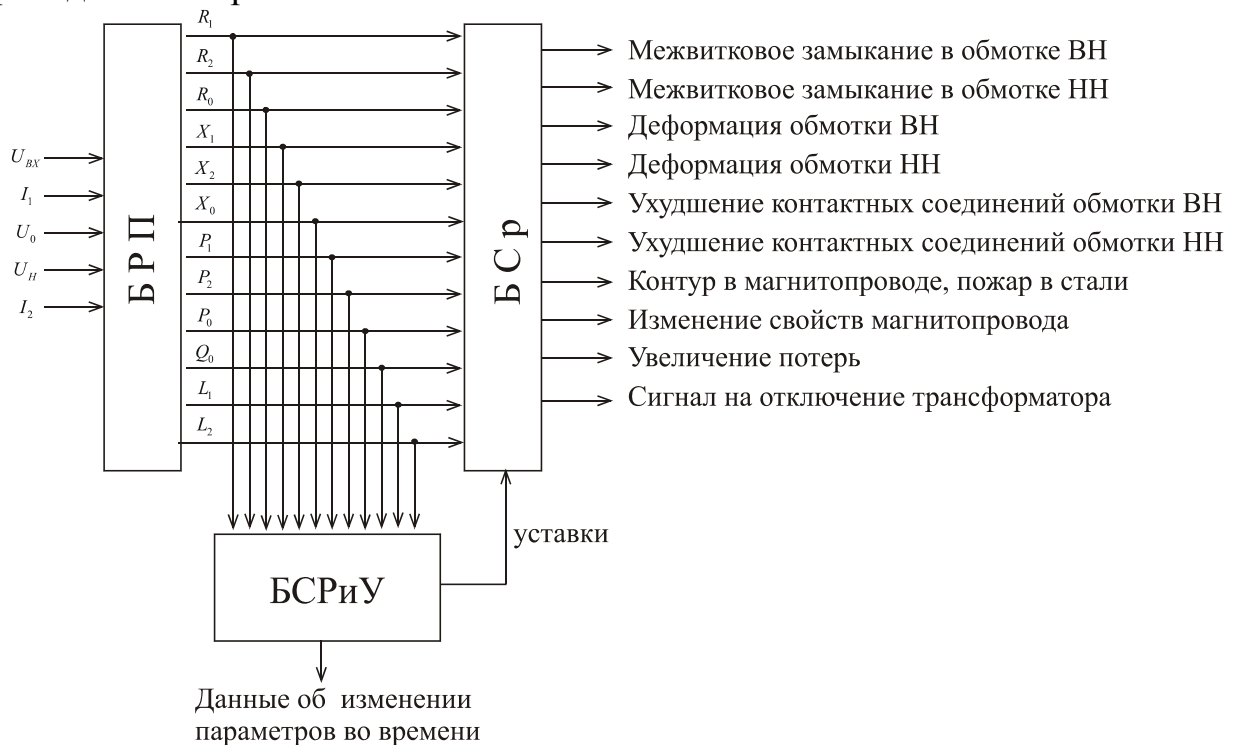


Рис. 9. Структурная схема ПАК

На вход блока расчета параметров (БРП) поступают массивы мгновенных значений токов и напряжений в обмотках трансформатора. В БРП по алгоритмам, описанным в главах 2 и 3, рассчитывают электромагнитные параметры трансформатора, а именно, параметры его схемы замещения, потери в обмотках и магнитопроводе, индуктивности рассеяния обмоток и намагничивающую мощность трансформатора. Параметры, рассчитанные в БРП, поступают на вход блока сравнения (БСр) и блока сохранения результатов и уставок (БСРиУ). В БСРиУ накапливаются данные об изменении параметров трансформатора за время его работы через некоторые одинаковые промежутки времени. Кроме того, в БСРиУ задаются уставки, относительно которых затем рассчитываются отклонения параметров. Эти уставки могут корректироваться в зависимости от предшествующих значений электромагнитных параметров. В блоке сравнения (БСр) значения параметров, получаемые из БРП, сравниваются со значениями уставок, задаваемых БСРиУ. В зависимости от величины, модуля и знака отклонения параметров от уставок на выходе БСр формируются сигналы о наличии той или иной неисправности трансформатора в соответствии с таблицей 1. При недопустимом увеличении отклонения подается сигнал о необходимости немедленного отключения трансформатора. Описываемая система непрерывно получает и сохраняет на жестком диске значения электромагнитных параметров трансформатора.

В качестве опорных значений электромагнитных параметров принимаются значения, полученные для данного трансформатора при первом включении системы мониторинга («заведомо исправное состояние трансформатора»). После капитального ремонта трансформатора опорные значения параметров могут быть уточнены.

Опорные значения должны определяться для нескольких режимов работы трансформатора. Выбор уставок, при превышении которых подается сигнал на отключение трансформатора, проводится на основе анализа статистических данных, полученных при эксплуатации трансформаторов с предлагаемой системой мониторинга.

Как частные случаи применения изложенного подхода в четвертой главе описаны два способа контроля состояния обмоток трансформатора.

- При оперативном контроле состояния обмоток однофазного трансформатора с ненагруженной обмоткой регистрируют массивы мгновенных значений входного и выходного напряжения, напряжения на ненагруженной обмотке, входного и выходного токов. Затем вторичные ток и напряжение приводят к первичной цепи и производят дифференцирование входного и выходного токов. Находят массив u_1 как разность мгновенных значений входного напряжения и приведенного напряжения на ненагруженной обмотке и массив u'_2 как разность мгновенных значений приведенного напряжения на ненагруженной обмотке и приведенного выходного напряжения. Далее методом характерных точек находят значения активных сопротивлений и индуктивностей рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Полученные значения усредняют на периоде и рассчитывают относительные отклонения средних значений активных сопротивлений и индуктивностей рассеяния обмоток от образцовых величин, определенных на заведомо исправном трансформаторе. Сравнивая полученные отклонения с заранее заданной уставкой, делают вывод об исправном, либо неисправном состоянии соответствующей обмотки контролируемого трансформатора.

• Второй способ оперативного контроля и защиты обмоток предполагает, что трансформатор не имеет ненагруженной обмотки и основан на определении параметров продольной ветви Г-образной схемы замещения трансформатора. При этом активное сопротивление обмоток определяют методом мощностей, а для определения индуктивности рассеяния обмоток решают уравнение

$$u_{BX}(t_j) - u'_H(t_j) = R_{12} \cdot i'_2(t_j) + L_{12} \frac{di'_2}{dt}(t_j)$$

относительно L_{12} для каждого момента времени t_j . Далее усредняют полученные значения индуктивности L_{12} на периоде и определяют относительные отклонения полученных значений индуктивности и активного сопротивления обмоток от величин, определенных на заведомо исправном трансформаторе. Сравнивая полученные отклонения с заранее заданной уставкой, делают вывод об исправном, либо неисправном состоянии обмоток контролируемого трансформатора. При превышении отклонением индуктивности и активного сопротивления обмоток заданного значения подают сигнал на отключение трансформатора.

Основные результаты работы:

• Предложены новые методы определения параметров продольных ветвей схемы замещения однофазного трансформатора по массивам мгновенных значений токов и напряжений – метод характерных точек (защищен патентом РФ), и метод решения системы разностных уравнений. Исследовано влияние интервала, для которого записаны уравнения, на точность результатов измерений, даны рекомендации по выбору этого интервала. Оба метода опробованы на маломощном однофазном трансформаторе.

• Решена задача определения параметров схемы замещения однофазного трансформаторов, не имеющих ненагруженной обмотки, в рабочем режиме. Для двухобмоточного трансформатора таким решением является использование упрощенной Г-образной схемы замещения. Методика опробована на маломощном трансформаторе, и защищена патентом РФ. Оценка погрешности показала её достаточно высокую точность.

• Для трехобмоточного однофазного трансформатора задача определения параметров схемы замещения в рабочем режиме решена на основе допущения о нулевом значении полного сопротивления обмотки, геометрически находящейся посередине двух других. Метод опробован на силовом трехобмоточном трансформаторе.

• Предложен метод построения «масштабированной» петли гистерезиса, которая соответствует динамической кривой намагничивания однофазного

трансформатора в рабочем режиме по массивам мгновенных значений токов и напряжений и показана возможность его использования при определении магнитных потерь однофазного трансформатора в рабочем режиме.

- Разработана схема замещения многообмоточного однофазного трансформатора и предложен метод определения её параметров в рабочем режиме, защищенный патентом РФ.

- Проведены испытания разработанных методов на однофазном трансформаторе цифро-аналого-физического комплекса ОАО «НИИПТ» и на силовом трехобмоточном трансформаторе ТДТН -63000/110/35/10, в рабочем режиме

- Даны рекомендации по организации мониторинга состояния обмоток и магнитной системы для однофазных трансформаторов четырех типов: трехобмоточных с ненагруженной обмоткой; двухобмоточных; трехобмоточных без ненагруженной обмотки; многообмоточных трансформаторов с любым количеством обмоток при наличии одной ненагруженной обмотки.

- Описаны два способа контроля состояния обмоток однофазного трансформатора в рабочем режиме.

Основные положения диссертации отражены в публикациях

1. Технический контроль параметров схемы замещения трансформаторов по результатам их измерений в режимах холостого хода и номинальной нагрузки. Гольдштейн Е.И., Бацева Н.Л., Панкратов А.В. // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Сб. статей. Ч. 1. Специальные электрические машины и электромагнитные устройства. Вопросы энергоснабжения. Образоват. Проекты. Екатеринбург: Вестник УГТУ-УПИ. 2003. №5(25). С.398-401.

2. А.В. Панкратов. К вопросу определения параметров схемы замещения трансформаторов малой мощности // IX международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Труды.– Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2003. –Т.1 с.34-35.

3. А.В. Панкратов. Определение параметров схемы замещения однофазного трансформатора по результатам опытов холостого хода и номинальной нагрузки // Материалы докладов всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации»: Изд-во НГТУ, 2003. Часть 1.- с.142-143.

4. А.В. Панкратов. Методы определения параметров схемы замещения однофазного трансформатора по массивам мгновенных значений токов и напряжений // Материалы докладов всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации»: Изд-во НГТУ, 2004. Часть 3.- с.103-104.

5. Вычислительные процедуры определения основных параметров и характеристик однофазных трансформаторов малой мощности в рабочем

режиме. Гольдштейн Е.И., Бацева Н.Л., Панкратов А.В. // 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. Патент РФ №47108 МПК7 G 01 R 27/02. Устройство для определения параметров продольных ветвей Т-образной схемы замещения однофазного трансформатора с незагруженной третьей обмоткой в рабочем режиме / Е.И. Гольдштейн, А.В. Панкратов. – Заявлено 17.02.2005; Оpubл. 10.08.2005. Бюлл. № 22.

7. Патент РФ №61891 МПК G01R 27/02. Устройство для определения параметров Т-образной схемы замещения многообмоточного однофазного трансформатора с одной ненагруженной обмоткой в рабочем режиме / Гольдштейн Е.И., Панкратов А.В. – Заявлено 29.11.2005; Оpubл. 10.03.2007 Бюлл. №7.

8. Патент РФ №2276376 МПК G01R 27/02. Способ определения параметров продольных ветвей Т-образной схемы замещения однофазного трансформатора с незагруженной третьей обмоткой в рабочем режиме / Гольдштейн Е.И., Панкратов А.В. – Заявлено 17.02.2005; Оpubл. 10.05.2006. Бюлл. №7.

9. А.В. Панкратов. Метод функционального диагностирования однофазных трансформаторов // Научно-техническое творчество студентов вузов. Матер. всерос. смотр-конкурса студ. вузов и «Эврика 2005»/ Мин-во образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. тех. ун-т.(НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005 г.– Ч.1.– с. 382-386.

10. А.В. Панкратов. Функциональное диагностирование однофазных трансформаторов по массивам мгновенных значений токов и напряжений // Физико-математическое моделирование систем: Материалы II Междунар. семинара. Ч. 2: Моделирование технических систем. Воронеж: Воронеж. гос. тех. ун-т, 2005. с. 29-34.

11. Функциональный контроль и диагностирование электроэнергетических систем и их элементов. Гольдштейн Е.И., Хрущев Ю.В., Сулайманов О.А., Бацева Н.Л., Джумик Д.В., Кац И.М., Радаев Е.В., Панкратов А.В. // Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками электроэнергии: Материалы Международного научно-технического семинара. – Томск: Томский политехнический университет, 2006. – 153 с.

12. E. Goldstein, A. Pankratov. The Determination of Single-phase Transformer No-load Losses // Information technologies and electrical engineering – device and systems, materials and technologies for the future: Materials of the 51st IWK – Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, German, pp. 383-384.

13. Патент РФ №61433 МПК7 G 01 R21/133. Устройство для определения магнитных потерь в магнитопроводе однофазного трансформатора с одной ненагруженной обмоткой // Гольдштейн Е.И., Панкратов А.В. – Заявлено 02.05.2006; Оpubл. 27.02.2007 Бюлл. №9.

14. Патент РФ №61434 МПК7 G 01 R21/133. Устройство для определения магнитных потерь в магнитопроводе однофазного трансформатора в рабочем

режиме // Гольдштейн Е.И., Панкратов А.В. – Заявлено 02.05.2006; Оpubл. 27.02.2007 Бюл. №9.

15. Патент РФ №2296339 МПК G01R 27/02. Способ определения параметров Т-образной схемы замещения многообмоточного однофазного трансформатора с одной ненагруженной обмоткой в рабочем режиме / Гольдштейн Е.И., Панкратов А.В. – Заявлено 29.11.2005; Оpubл. 27.03.2007 Бюл. №9.

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

17. Патент РФ №2304787 МПК G 01 R21/133. Способ определения магнитных потерь в магнитопроводе однофазного трансформатора в рабочем режиме/ Гольдштейн Е.И., Панкратов А.В. – Заявлено 02.05.2006; Оpubл. 20.08.2007 Бюл. №23.

18. Патент РФ №71446 МПК G 01 R 31/02. Устройство для оперативного контроля состояния обмоток однофазного трансформатора с ненагруженной обмоткой / Е.И. Гольдштейн, А.В. Панкратов, Н.Н. Харлов – Заявлено 27.08.2007; Оpubл. 10.03.2008 Бюл. №7.

19. Патент РФ №71445 МПК G 01 R 31/02. Устройство для оперативного контроля и защиты обмоток трансформатора / Е.И. Гольдштейн, А.В. Панкратов, Н.Н. Харлов – Заявлено 27.08.2007; Оpubл. 10.03.2008 Бюл. №7.

20. Патент РФ №71443 МПК G 01 R 21/133. Устройство для определения мгновенных значений индуктивности намагничивания однофазного трансформатора / Е.И. Гольдштейн, А.В. Панкратов, Ю.В. Хрущев – Заявлено 27.08.2007; Оpubл. 10.03.2008 Бюл. №7.

21. Патент РФ №71444 МПК G 01 R 21/133. Устройство для определения мгновенных значений индуктивности намагничивания однофазного трансформатора / Е.И. Гольдштейн, А.В. Панкратов – Заявлено 27.08.2007; Оpubл. 10.03.2008 Бюл. №7.

22. Патент РФ №2333503 МПК G 01 R 31/02. Способ оперативного контроля состояния обмоток однофазного трансформатора с ненагруженной обмоткой / Гольдштейн Е.И., Панкратов А.В. - Заявлено 18.06.2007; Оpubл. 10.09.2008.

23. Патент РФ №2339963 МПК G 01 R 31/06. Способ оперативного контроля и защиты обмоток трансформатора / Гольдштейн Е.И., Панкратов А.В. - Заявлено 22.06.2007; Оpubл. 27.11.2008 Бюл. №33.

24. Патент РФ №2340907 МПК G 01 R 21/00. Способ определения мгновенных значений индуктивности намагничивания однофазного трансформатора / Гольдштейн Е.И., Панкратов А.В. - Заявлено 10.08.2007; Оpubл. 10.12.2008 Бюл. №34.

25. Патент РФ №2340908 МПК G 01 R 21/00. Способ определения мгновенных значений индуктивности намагничивания однофазного

трансформатора / Гольдштейн Е.И., Панкратов А.В. - Заявлено 20.08.2007; Оpubл. 10.12.2008 Бюл. №34.

26. Патент РФ №73493 МПК G 01 R 27/02. Устройство для определения параметров Г-образной схемы замещения однофазного двухобмоточного трансформатора в рабочем режиме / Е.И. Гольдштейн, А.В. Панкратов – Заявлено 29.11.2005; Оpubл. 20.05.2008.

27. Гольдштейн Е.И., Панкратов А.В. Определение параметров и характеристик ветви намагничивания однофазного трансформатора по массивам мгновенных значений токов и напряжений // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2008. – №5. – С. 20-24.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Подписано в печать 31.03.2009 г. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Печать плоская. Усл. печ. л. 1,22. Уч.-изд. 1,10. Тираж 100 экземпляров.
Отпечатано ООО «СПБ Графика». Заказ № 05.
Адрес: 634034, г. Томск, ул. Усова, 4а-150, т. (38-22) 224-789

