

На правах рукописи

Воронова Тамара Сергеевна

**ДЕСОРБЦИОННО-ТЕРМОКОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД
ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОЗДУХА
В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ,
материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2002 г.

Работа выполнена в ОАО «Ангарское опытно-конструкторское бюро автоматики».

Научный руководитель: Бадеников Виктор Яковлевич,
д. т. н., ректор Ангарской государственной
технической академии, г. Ангарск

Научный консультант: Иващенко Виталий Евгеньевич,
к. т. н., начальник научно-исследовательского
центра приборостроения ОАО «Ангарское
ОКБА», г. Ангарск

Официальные оппоненты: Москалев Владлен Александрович,
д. т. н., профессор Томского политехнического
университета, г. Томск
Половнева Светлана Ивановна,
к. т. н., доцент Иркутского государственного
технического университета, г. Иркутск

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие «Восточно-Сибирский научно-
исследовательский институт физико-
технических и радиотехнических измерений»,
г. Иркутск

Защита состоится «9» декабря 2002 г. в 15 часов на заседании
диссертационного Совета Д 212.269.09 при Томском политехническом
университете по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 3.
Библиотека НИИ интроскопии.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского
политехнического университета.

Автореферат разослан «8» ноября 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета _____ Б.Б.Винокуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Для передачи энергии на большие расстояния в электроэнергетике используются мощные силовые трансформаторы, изоляционным материалом и теплоотводящей средой в которых служит нефтяное трансформаторное масло (далее масло). К числу важных контролируемых параметров масла, оказывающих существенное влияние на длительность и надёжность работы трансформаторов, относится «общее газосодержание», под которым в электроэнергетике принято считать концентрацию растворенного в масле воздуха. Контроль этого параметра должен осуществляться в диапазоне от 0,1 до 12,0 % (по объёму). Согласно нормативной документации «общее газосодержание» масла при заливке в трансформатор должно быть не более 0,2 % (по объёму). В процессе эксплуатации трансформаторов оно увеличивается и может достигать 6 % и более.

Присутствие в масле растворенных газов приводит к окислению масла, образованию центров развития электрических разрядов, что в конечном итоге способствует пробоем обмоток трансформатора и выходу его из строя.

Поскольку потери, которые несут энергокомпании в результате аварий трансформаторов, весьма существенны, контроль качества масла и, в частности, «общего газосодержания» необходим как при подготовке трансформаторов к работе, так и при их эксплуатации. Используемые в настоящее время технические средства и методики контроля концентрации воздуха, основанные на манометрическом и газохроматографическом методах, из-за присущих им недостатков (низкие точность и воспроизводимость результатов для манометрического метода, сложность и длительность анализа для хроматографического метода), не удовлетворяют потребителей.

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью разработки метода измерений, пригодного для создания на его основе точных, надежных и простых в обслуживании лабораторных и промышленных измерителей концентрации воздуха в масле.

Цель работы

Целью работы является разработка десорбционно-термокондуктометрического метода (ДТКМ) измерения концентрации растворенного в масле воздуха и практическая реализация результатов исследований ДТКМ в приборах контроля, удовлетворяющих требованиям электроэнергетики по диапазону измерений, точности, стабильности метрологических характеристик, продолжительности анализа, простоте и удобству использования.

Научная новизна работы

- Предложен и исследован десорбционно-термокондуктометрической метод измерений концентрации воздуха, растворенного в масле.
- Теоретически выведена и экспериментально подтверждена математическая модель статической характеристики (далее СХ) измерителя.
- Выведены и экспериментально подтверждены аналитические зависимости для оценки чувствительности, нижнего предела измерений и времени анализа.
- Определены частные составляющие погрешности измерений и показан вклад каждой из них в суммарную погрешность ДТКМ.

Практическая ценность работы

- На базе проведённых исследований сформулированы исходные данные по проектированию прибора для измерений концентрации воздуха в масле, благодаря чему стали возможны разработка и серийное производство измерителя объёмной доли воздуха в масле.
- Использование математической модели СХ и аналитических выражений для определения времени анализа позволило оптимизировать разработку измерителей с требуемыми метрологическими характеристиками.
- Разработано метрологическое обеспечение измерителя объёмной доли воздуха в масле, основанного на применении для поверки и калибровки дозированных объемов воздуха.
- Результаты исследований позволяют расширить область применения метода и могут быть использованы при разработке анализаторов растворённых газов не только в трансформаторном масле, но и в других органических жидкостях.

Внедрение результатов работы

Разработанный на основе ДТКМ измеритель объёмной доли воздуха в масле «Иркут» успешно прошёл Государственные испытания по присвоению типа средств измерений, на основании чего получен сертификат о регистрации его в Госреестре средств измерений (№ 20375-00).

В ОАО «Ангарское ОКБА» в 2000÷01 г.г. освоен серийный выпуск приборов типа «Иркут», которые изготовлены, поставлены и работают на предприятиях энергетики, решая возложенные на них задачи.

Прибор экспонировался на выставке «Энергетика и энергосбережения. Приборы и оборудование для неразрушающего контроля» в «Сибэкспоцентре» (город Иркутск), где ОАО «Ангарское ОКБА» отмечено дипломом «За разработку нового прибора ИРКУТ, не имеющего аналогов».

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях «Современные технологии и научно-технический прогресс», (г.Ангарск) в 2001 и 2002 г.г., на научно-техническом совете ОАО «Ангарское опытно-конструкторское бюро автоматики» в 1999-2002 г.г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано пять статей и тезисов докладов, получено положительное решение ФИПС по заявке № 2001413618/28 на изобретение «Способ измерения концентрации газов, растворенных в трансформаторном масле» (приоритет от 18.05.2000 г.)

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 140 страницах машинописного текста, содержит 28 рисунков, 14 таблиц. Список литературы содержит 103 наименования. В приложении приведены материалы, подтверждающие внедрение результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отмечаются научная новизна и практическое значение работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основании литературного обзора показано негативное влияние воздуха на качество и изоляционные свойства масла, что вызывает необходимость контроля содержания воздуха в масле. Растворенный в масле воздух рассматривается как сумма концентраций азота и кислорода с учетом того, что содержание прочих газов в масле не превышает 1- 2 % от общей концентрации газов.

Для измерения концентрации воздуха в масле в настоящее время применяются два метода: манометрический и газохроматографический. Первый из них основан на измерении давления выделенных из масла газов. Он реализован в абсорциометре, которым обычно оборудованы дегазационные установки, а также в лабораторной установке УИВВМ. Основным недостатком этого метода является низкая точность измерений, особенно в области малых концентраций газов. На результаты анализа оказывает влияние растворенная в масле вода.

Другим методом, более широко используемым по сравнению с манометрическим, является газохроматографический. Он основан на прямом вводе в испаритель хроматографа пробы масла. После прохождения через хроматографическую колонку выделенный воздух потоком газа-носителя подается в катарометр для анализа. В силу своей универсальности и

приемлемой точности газохроматографический метод положен в основу нескольких методик определения воздуха в масле, используемых электротехническими службами. Однако, следует отметить, что этот метод является сугубо лабораторным, требующим дорогостоящего оборудования и высокой квалификации обслуживающего техперсонала.

В качестве объекта исследований рассматривается десорбционно-термокондуктометрический метод, основанный на десорбции из дозы масла растворенных в нем воздуха и воды путем барботирования через масло газаносителя, последующего удаления паров воды кулонометрическим осушителем и определении концентрации воздуха с помощью термокондуктометрической ячейки. Достоинствами ДТКМ являются возможность обеспечения полной десорбции воздуха из анализируемого масла более простым путем, по сравнению с применяемыми ранее, исключение влияния растворенной в масле воды на результаты анализа, высокая чувствительность в широком диапазоне концентраций, малое время анализа.

Определены задачи, которые должны быть решены в процессе выполнения работы:

- провести исследования ДТКМ с целью создания прибора для измерения концентрации воздуха в масле, удовлетворяющего по метрологическим характеристикам требованиям электроэнергетики;
- разработать схему и собрать установку (измеритель), реализующую ДТКМ;
- найти аналитическую зависимость для описания статической характеристики измерителя;
- произвести оценку чувствительности и нижнего предела измерений;
- найти аналитические выражения для определения времени анализа измерителя и произвести экспериментальное определение влияющих на него параметров;
- определить составляющие погрешности измерителя и оценить их вклад в суммарную погрешность;
- произвести экспериментальную проверку теоретически полученных зависимостей и допущений, принятых при их выводе;
- определить конструктивные параметры основных узлов измерителя, обеспечивающие создание прибора со следующими метрологическими характеристиками:
 - а) диапазон измерений объемной доли воздуха в масле от 0,1 до 12,0 %;
 - б) абсолютная погрешность не более $\pm 0,1$ % в диапазоне измерений от 0,1 до 1,0 % и $\pm 0,5$ % в диапазоне свыше 1,0 до 12,0 %;
 - в) время анализа не более 5 мин;
- разработать метрологическое обеспечение измерителя;
- осуществить практическое внедрение результатов работы;
- сформулировать задачи исследований по расширению области применения ДТКМ.

Во второй главе выполнено теоретическое исследование ДТКМ, позволяющее оценить его возможности. С этой целью была рассмотрена работа измерительной установки (далее измеритель), реализующей ДТКМ. В десорбционную колонку, в которую вводится доза анализируемого масла, поступает газ-носитель (гелий) для обеспечения десорбции воздуха из масла. В процессе десорбции кроме воздуха в гелий попадают также пары воды. После выхода из колонки гелий с извлеченным воздухом и влагой подается на кулонометрический влагочувствительный элемент, служащий в качестве осушителя. Проходя через кулонометрический осушитель, влага полностью поглощается и осушенный гелий с воздухом подается в термокондуктометрическую ячейку (далее ТКЯ). Выходной сигнал ТКЯ в виде напряжения постоянного тока, функционально связанного с концентрацией воздуха в гелии в каждый момент времени, интегрируется за время анализа и после обработки может быть представлен в виде объемной доли растворенного в масле воздуха в соответствии со статической характеристикой (далее СХ).

Десорбционная колонка представляет собой десорбер со сплошным барботажным слоем, в котором осуществляется непрерывный контакт между жидкой фазой (масло) и газовой фазой (гелий), за счет чего происходит процесс массопередачи воздуха из масла в гелий. Массопередача, обусловленная градиентом концентрации воздуха между маслом и гелием, происходит при отсутствии равновесия между фазами, что обеспечивает полноту десорбции воздуха. Скорости убывания концентраций азота a_1 и кислорода a_2 в объеме дозы анализируемого масла V определяются дифференциальными уравнениями (при начальных условиях $a_1(t=0)=a_{01}$; $a_2(t=0)=a_{02}$, где a_{01} и a_{02} – исходные концентрации азота и кислорода в масле)

$$\frac{da_1}{dt} = -\frac{\beta_1 \cdot S \cdot a_1}{V \cdot K_1}, \quad \frac{da_2}{dt} = -\frac{\beta_2 \cdot S \cdot a_2}{V \cdot K_2}, \quad (1)$$

где β_1, β_2 - коэффициенты массопередачи азота и кислорода в масле;
 S – площадь поверхности массопередачи;
 K_1 и K_2 – коэффициенты растворимости азота и кислорода в масле;
 t – время.

Прежде, чем гелий с анализируемым воздухом попадет для измерения в ТКЯ, он должен пройти через газовый тракт, состоящий из свободной от масла части десорбционной колонки, кулонометрического осушителя и соединительных трубок. Его можно рассматривать как звено направленного действия, передающее воздух из десорбционной колонки в ТКЯ.

Если пренебречь инерционностью ТКЯ, ее выходной сигнал, $y(t)$, в каждый момент времени будет определяться процессами массопередачи в десорбционной колонке и передачи анализируемого воздуха по газовому тракту, который можно представить инерционным звеном первого порядка. Тогда уравнение динамики газового тракта можно представить в виде

$$\tau_2 \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \cdot c_{01} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{11}}\right) + k \cdot c_{02} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{21}}\right), \quad (2)$$

где τ_2 - постоянная времени газового тракта;

k – коэффициент пропорциональности между выходным сигналом ТКЯ $y(t)$ и концентрацией воздуха в гелии c_g ;

c_{01} , c_{02} – объемные концентрации азота и кислорода в гелии на выходе из масла в начальный момент времени (объемные доли);

τ_{11} , τ_{12} – постоянные времени десорбционной колонки для азота и кислорода.

Величины c_{01} , c_{02} и τ_{11} , τ_{12} получены при решении дифференциальных уравнений (1) и определяются формулами:

$$c_{01} = \frac{\beta_1 \cdot S \cdot a_{01}}{q \cdot K_1}, \quad c_{02} = \frac{\beta_2 \cdot S \cdot a_{02}}{q \cdot K_2}, \quad (3)$$

$$\tau_{11} = \frac{K_1 \cdot V}{\beta_1 \cdot S}, \quad \tau_{12} = \frac{K_2 \cdot V}{\beta_2 \cdot S}, \quad (4)$$

где q - расход газа-носителя.

После решения дифференциального уравнения (2) (начальные условия $y(t) = 0$ при $t = 0$), получим, что

$$y(t) = -k \left(\frac{c_{01} \cdot \tau_{11}}{\tau_{11} - \tau_2} + \frac{c_{02} \cdot \tau_{12}}{\tau_{12} - \tau_2} \right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + \frac{k \cdot c_{01} \cdot \tau_{11}}{\tau_{11} - \tau_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{11}}\right) + \frac{k \cdot c_{02} \cdot \tau_{12}}{\tau_{12} - \tau_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{12}}\right). \quad (5)$$

Интегрированием выходного сигнала ТКЯ за время проведения анализа θ можно определить выходной сигнал измерителя Y . При условии, что время интегрирования

$$\theta \gg \tau_{11}, \theta \gg \tau_{12} \text{ и } \theta \gg \tau_2, \quad (6)$$

верхний предел интеграла можно принять равным бесконечности. В этом случае

$$Y = \int_0^{\infty} y(t) \cdot dt = k(c_{01} \cdot \tau_{11} + c_{02} \cdot \tau_{12}). \quad (7)$$

Подставляя в уравнение (7) значения c_{01} , c_{02} , τ_{11} и τ_{12} из уравнений (3) и (4), получим СХ измерителя, т.е. зависимость выходного сигнала измерителя Y от концентрации воздуха в масле a_0 :

$$Y = \frac{k \cdot V}{q} (a_{01} + a_{02}) = \frac{k \cdot V}{q} \cdot a_0, \quad (8)$$

где $a_0 = a_{01} + a_{02}$.

Важными особенностями полученной СХ, обеспечивающими удобство ее практического использования, являются:

- отсутствие в аналитическом выражении коэффициентов и площади поверхности массопередачи при условии выбора времени анализа достаточного, чтобы выполнялись неравенства (6);

- линейность шкалы измерителя, что удобно с точки зрения приборной реализации.

Множитель $k \cdot V/q = r$, входящий в СХ, определяет чувствительность измерителя.

Показано, что нижний предел измеряемой концентрации воздуха в масле $a_{0,мин}$ определяется выражением

$$a_{0\text{мин}} \geq \frac{\Delta U_{ш} \cdot \theta}{r \cdot \delta_n}, \quad (9)$$

где $\Delta U_{ш}$ – уровень «шума» ТКЯ;
 θ - время анализа;
 δ_n - нормируемая погрешности измерений.

Если принять реально достижимые значения параметров $\Delta U_{ш} = 0,001\text{мВ}$; $\theta = 3$ мин; $r = 0,0252$ В·мин, то минимальная концентрация воздуха в масле, которую можно определить измерителем с относительной погрешностью $\delta_n = 10\%$, составит $0,12\%$ объемных.

Получено аналитическое выражение для определения относительной погрешности измерений δ_θ за счет конечного времени анализа при $\gamma = \tau_2 / \tau_1$ и $\varepsilon = \theta / \tau_1$:

$$\delta_\theta(\gamma, \varepsilon) = \frac{1}{1-\gamma} \left[\exp(-\varepsilon) - \gamma \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\gamma}\right) \right]. \quad (10)$$

Выражение (10) позволяет определить минимальное время анализа при заданной $\delta_{\theta\text{норм}}$. Здесь постоянная времени десорбции воздуха τ_1 выбрана равной максимальной из постоянных времени τ_{11} или τ_{12} при допущении, что $\tau_1 = \tau_{11} = \tau_{12}$. Как видно из рис. 1, если задаться погрешностью $\delta_{\theta\text{норм}} \leq 1\%$, то время анализа должно быть выбрано в пределах $(5 \div 5,5) \tau_1$ в зависимости от соотношения между τ_1 и τ_2 . При $\theta = 6 \tau_1$ и $\gamma = \tau_2 / \tau_1 \leq 0,5$ погрешность δ_θ не превысит $0,5\%$.

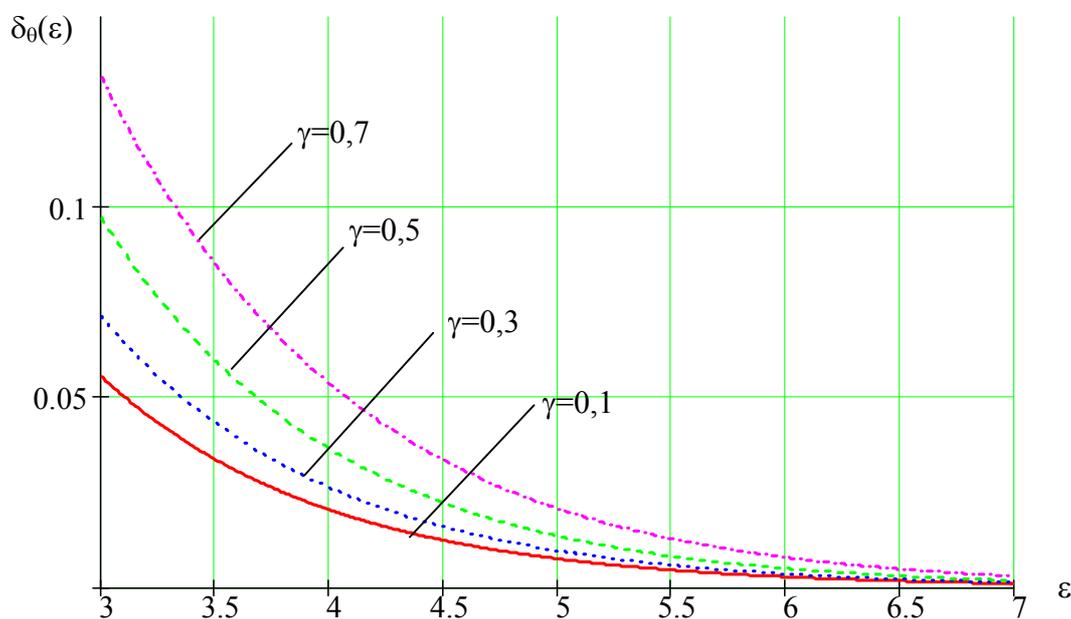


Рис.1. Семейство кривых $\delta_\theta(\varepsilon)$ при различных $\gamma = \tau_2 / \tau_1$

Поскольку постоянные времена τ_1 и τ_2 в значительной степени зависят от конструктивных особенностей и режимов работы измерителя, их определение производится на основе экспериментальных данных.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям ДТКМ. В процессе выполнения этих работ требовалось решить следующие основные вопросы: провести опытную проверку выведенных аналитических зависимостей, проверить допущения, принятые при их выводе и не являющиеся очевидными, и осуществить выбор оптимальных конструктивных параметров и режимов работы измерителя с целью обеспечения заданных при постановке задач исследования метрологических характеристик.

Эксперименты проводились на специально разработанной и изготовленной опытной установке (рис. 2), включающей в себя, помимо приведенных ранее элементов измерителя, стабилизатор расхода газа на входе в газовую систему измерителя и электрическую схему обработки выходного сигнала ТКЯ, состоящую из интегратора и блока обработки информации. Результат измерений представлялся на цифровом табло. Выходной сигнал ТКЯ регистрировался также на ленте автоматического потенциометра.

Разработанная конструкция десорбционной колонки обеспечивала возможность удаления из колонки масла после анализа, а также отсутствие брызг масла в газовой смеси на выходе из колонки во избежание загрязнения осушителя и чувствительных элементов ТКЯ.

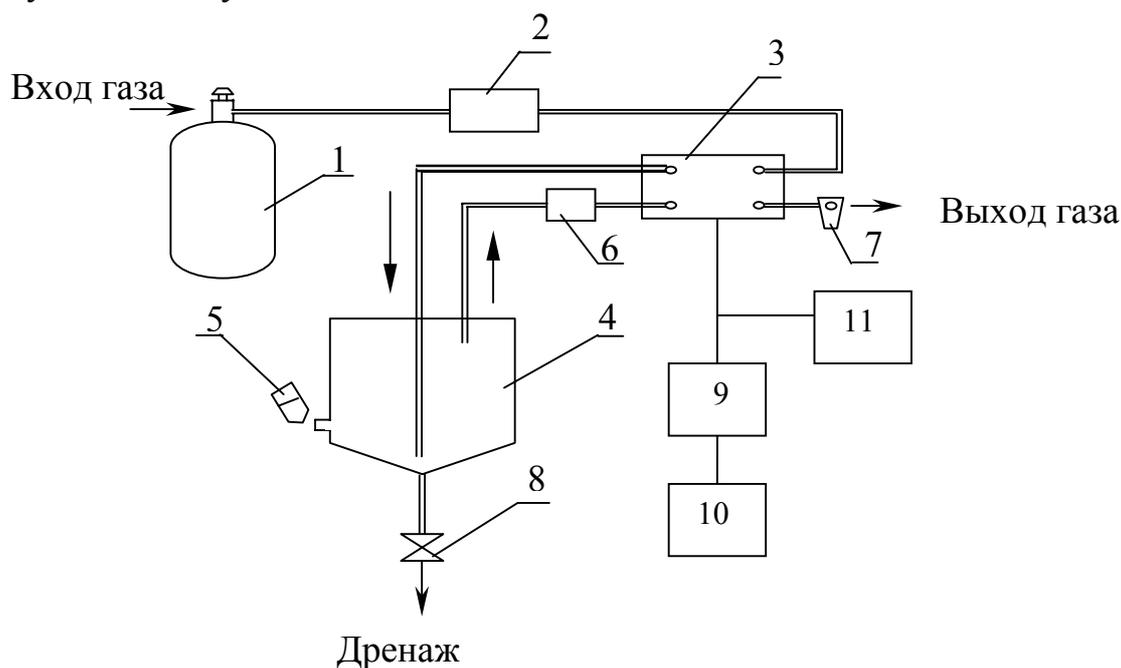


Рис. 2. Блок-схема установки, реализующей ДТКМ

1-баллон с гелием; 2- стабилизатор расхода газа; 3 – термокондуктометрическая ячейка; 4 – десорбционная колонка; 5 – шприц-дозатор; 6 – кулонометрический осушитель; 7 – ротаметр; 8 – клапан для слива масла; 9 – интегратор; 10 – блок обработки сигнала интегратора; 11 – автоматический потенциометр

В качестве осушителя впервые был использован кулонометрический чувствительный элемент, традиционно используемый в гигрометрах микроконцентраций влаги воздуха. Он представляет собой цилиндрический

стеклянный корпус, во внутреннем канале которого расположены два платиновых электрода, выполненных в виде геликоидальных несоприкасающихся спиралей, на которые подается напряжение постоянного тока. Между электродами нанесена пленка частично гидратированной пятиоксида фосфора (P_2O_5). Работа осушителя осуществлялась следующим образом. В течение времени анализа напряжение на электроды не подается. Поэтому при прохождении влажного газа через канал осушителя (диаметром от 0,5 до 2 мм и длиной 70 – 100 мм) пары воды поглощаются P_2O_5 и газ на выходе из канала становится практически полностью осушенным. После окончания анализа на электроды осушителя подается напряжение, в результате чего происходит электролитическое разложение накопленной влаги на кислород и водород с последующим удалением их потоком газаносителя.

Экспериментальными исследованиями были проверены сделанные при выводе аналитических зависимостей предположения, а именно:

- возможность пренебрежения инерционностью ТКЯ;
- равенство постоянных времени десорбционной колонки по азоту и кислороду;
- возможность представления газового тракта инерционным звеном первого порядка (апериодическим звеном).

Экспериментальными исследованиями подтверждено, что инерционность ТКЯ как минимум на порядок меньше инерционности других звеньев измерителя и ею можно пренебречь.

Установлено, что постоянные времена десорбционной колонки τ_{11} и τ_{12} , определенные при одинаковых условиях на пробах масла, содержащих отдельно азот или кислород, практически не отличаются между собой и равны постоянной времени воздуха. Поэтому вместо них можно использовать постоянную времени десорбционной колонки по воздуху τ_1 . С учетом этого, выражение (1) преобразуется к виду

$$y(t) = \frac{k \cdot \tau_1 \cdot C_{0B}}{\tau_1 - \tau_2} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right], \quad (11)$$

где $C_{0B} = C_{01} + C_{02}$ – объемная концентрация воздуха в гелии на выходе из масла в начальный момент времени.

Изучение формы переходной характеристики, полученной при скачкообразном изменении концентрации воздуха на входе в газовый тракт, показывает, что она имеет экспоненциальный вид. В связи с этим можно считать газовый тракт апериодическим звеном.

Таким образом, результаты экспериментов подтвердили все три допущения, принятые при выводе аналитических зависимостей.

Определение СХ измерителя проводилось путем нахождения точечных оценок математического ожидания выходного сигнала измерителя при заданных значениях объемной доли воздуха в масле в пределах диапазона измерений. Результаты экспериментов показали, что расхождения между экспериментальными данными и действительными значениями объемной

доли воздуха в масле не превышают 0,05 и 0,25 % в диапазонах измерений, соответственно, от 0,1 до 1,0 и 1,0 до 12 %. Удовлетворительная сходимость экспериментальных данных с полученными теоретически подтверждает правильность сделанных предположений при выводе СХ измерителя.

Установлено, что увеличение объема дозы масла при сохранении постоянным расхода гелия (рис. 3) или снижение расхода гелия при постоянном объеме дозы (рис. 4) приводят к пропорциональному увеличению чувствительности измерителя, что подтверждает применимость уравнения (8) для описания СХ измерителя на базе ДТКМ.

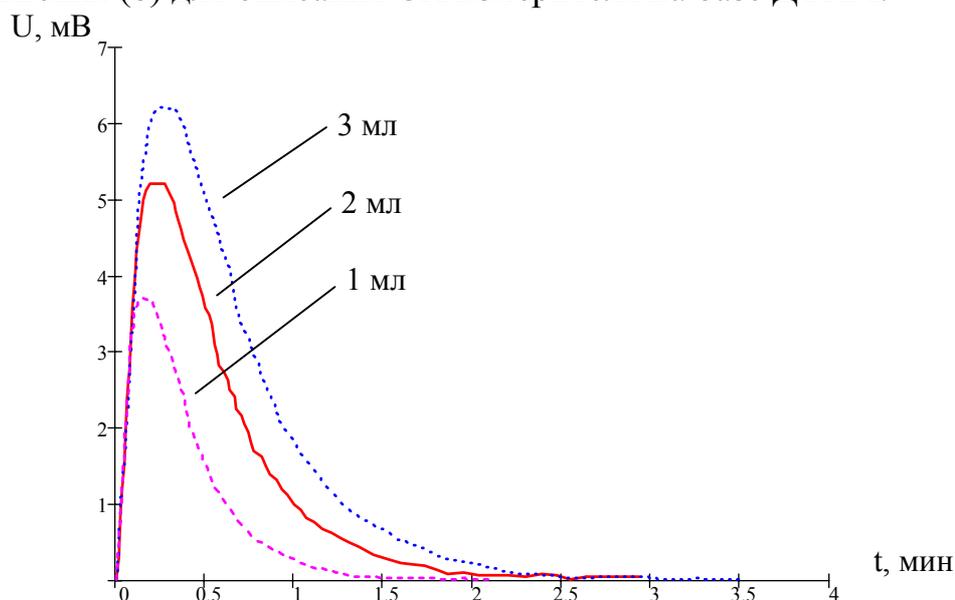


Рис. 3. Выходные сигналы ТКЯ при объемах дозы масла 1, 2 и 3 мл

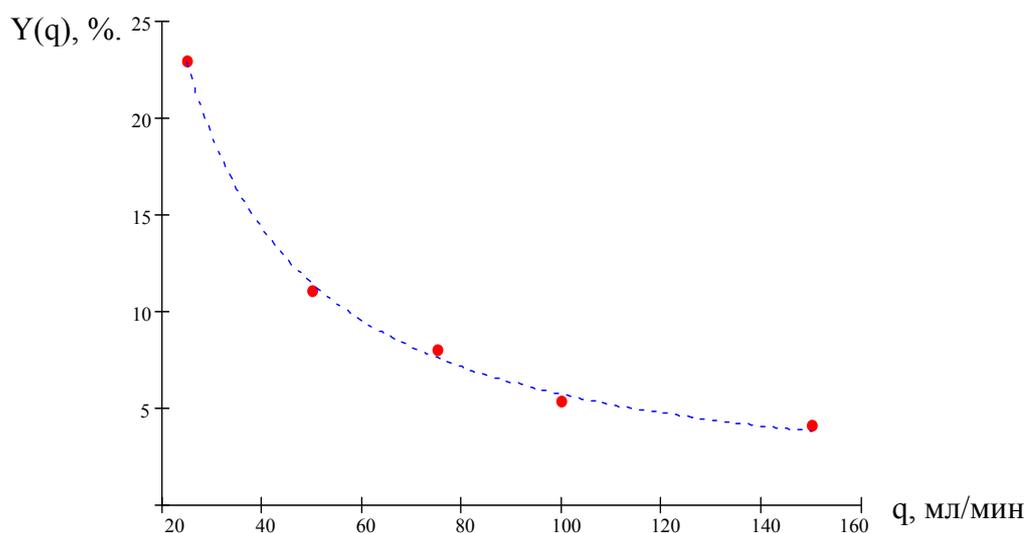


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала измерителя от изменения расхода газа-носителя

Метрологические характеристики измерителя, такие как диапазон измерений, погрешность, в значительной степени зависят от коэффициента чувствительности ТКЯ, определяемого физическими константами ее

материалов и конструктивными параметрами. Как показали результаты экспериментальных исследований, оптимальной с точки зрения обеспечения требуемой чувствительности является ТКЯ с коэффициентом чувствительности $6,3 \cdot 10^{-3}$ В / % об.

Определено влияние конструктивных параметров десорбционной колонки и газового тракта, а также расхода гелия на постоянные времена τ_1 и τ_2 . Установлено, что снижения постоянной времени газового тракта τ_2 можно достичь уменьшением его объема или увеличением расхода газа. Изучение динамики газового тракта, проводимое по записанным на ленте автоматического потенциометра переходным характеристикам при скачкообразном изменении концентрации воздуха в десорбционной колонке, показало что при минимально возможном объеме газового тракта (около 6 см^3) при расходах гелия 25; 50; 75 и $100 \text{ см}^3/\text{мин}$ величина τ_2 составила 16,5; 8,0; 5,2 и 4,2 с, соответственно.

Постоянная времени десорбционной колонки, в основном, зависит от коэффициента и площади поверхности массопередачи, которые определяются режимом барботажа, зависящим от диаметров колонки и отверстий барботажной трубки, а также от объема жидкости и расхода газаносителя. С целью предотвращения уноса брызг, режим барботажа выбран переходным между пузырьковым и пенным. Учитывая многофакторную зависимость режима барботажа, объем дозы масла (2 мл) и расход гелия ($50 \text{ см}^3/\text{мин}$) были выбраны из условия технических и метрологических требований, предъявляемых к измерителю. Диаметр десорбционной колонки и радиус отверстий барботажной трубки, равны 12 и 0,04 мм, соответственно. При этих условиях обеспечивается оптимальный режим барботажа.

Определение постоянной времени десорбционной колонки производилось по времени появления максимума $t_{\text{макс}}$ выходного сигнала ТКЯ $y(t)$, которое равно

$$t_{\text{макс}} = \tau_2 \frac{\ln(\tau_1 / \tau_2)}{1 - \tau_2 / \tau_1} \quad (12)$$

Используя (12), при известном $\tau_2 = 8$ с определено, что постоянная времени τ_1 составляет 29 с. С учетом полученных значений постоянных времени, полное время анализа было выбрано равным 3 мин. При этом в соответствии с (10) δ_θ не превысит 0,5 %.

Экспериментальная проверка СХ, осуществленная с помощью проб масла с заданным содержанием воздуха, подтвердила линейность СХ при постоянных объеме дозы и расходе газаносителя. При этом средние квадратические отклонения (далее СКО) показаний измерителя от действительных значений объемной доли воздуха в масле не превысили 0,03 % (об.) в области значений от 0,1 до 1,0 % (об.) и 0,13 % (об.) в области значений от 1,0 до 12,0 % (об.)

Сравнение экспериментально полученной записи выходного сигнала с кривой, полученной по выражению (9) и рассчитанной с помощью компьютера, показало удовлетворительную сходимость между кривыми

(корреляционное отношение равно 0,9843), что подтверждает правильность полученных зависимостей и возможность их использования при проектировании прибора.

В четвертой главе проанализированы погрешности ДТКМ. Определено, что суммарная абсолютная погрешность $\Delta_{\Sigma}(a_0)$ определяется случайной $\Delta_{\Sigma_{сл}}(a_0)$ и систематической составляющими $\Delta_{\Sigma_{сис}}(a_0)$.

Систематическая составляющая абсолютной погрешности $\Delta_{сис}(a_0)$, обусловленная конечным временем анализа может быть учтена при калибровке прибора и тем самым исключена.

Случайная составляющая погрешности определялась методом косвенных измерений объемной доли воздуха в масле a_0 в соответствии с СХ. СКО суммарной случайной погрешности определяется формулой:

$$\sigma_{\Sigma_{сл}}(a_0) = \sqrt{\left(\frac{q}{k \cdot V}\right)^2 \cdot \sigma^2(Y) + \left(\frac{Y}{k \cdot V}\right)^2 \cdot \sigma^2(q) + \left(\frac{Y \cdot q}{k^2 \cdot V}\right)^2 \cdot \sigma^2(k) + \left(\frac{Y \cdot q}{k \cdot V^2}\right)^2 \cdot \sigma^2(V)}, \quad (13)$$

где $\sigma(Y)$, $\sigma(q)$, $\sigma(k)$, $\sigma(V)$ – СКО частных составляющих суммарной случайной погрешности за счет нестабильности обработки выходного сигнала ТКЯ, изменения расхода газа-носителя, нестабильности коэффициента чувствительности ТКЯ, невоспроизводимости объема вводимой дозы масла. При известном законе распределения суммарной случайной погрешности $\Delta_{\Sigma_{сл}}(a_0) = t_{к\sigma} \cdot \sigma_{\Sigma_{сл}}(a_0)$, где $t_{к\sigma}$ – квантильный коэффициент, соответствующий закону распределения и доверительной вероятности.

Расчет суммарной погрешности и ее составляющих, с целью определения наиболее значимых из них, был произведен на примере измерителя «Иркут».

Основной вклад в суммарную случайную погрешность при малых концентрациях воздуха в масле (менее 1,0 % об.) вносит погрешность за счет «шума» ТКЯ (аддитивная составляющая). С ростом концентрации воздуха в масле возрастает роль мультипликативных составляющих: за счет невоспроизводимости объема дозы масла, нестабильности расхода газа-носителя и погрешности градуировки. Как показал расчет погрешностей, вклад этих мультипликативных составляющих в случайную суммарную погрешность примерно одинаковый. При этом такими составляющими случайной погрешности, как погрешность квантования, погрешности за счет нестабильности коэффициента усиления усилителя и коэффициента чувствительности ТКЯ, можно пренебречь в силу их незначительности.

СКО суммарной случайной абсолютной погрешности составили:

- 0,016 % об. при концентрации воздуха в масле 0,1 % об.;
- 0,022 % об. при концентрации воздуха в масле 1,0 % об.;
- 0,154 % об. при концентрации воздуха в масле 10,0 % об.

В ходе анализа погрешностей рассматривался закон распределения каждой из составляющих суммарной погрешности, что необходимо для расчета их СКО, а также для определения закона распределения случайной

суммарной погрешности. Определено, что суммарная погрешность распределена по нормальному закону, поскольку она сформирована из составляющих с нормальным законом распределения погрешности. Гипотеза о нормальности закона распределения суммарной погрешности измерителя подтверждена с помощью критерия χ^2 -Пирсона.

В этом случае при доверительной вероятности 0,95 максимальные значения суммарной случайной абсолютной погрешности измерителя $\Delta_{\Sigma сл}(a_0)$ равны:

- $\pm 0,03$ % об. при концентрации воздуха в масле 0,1 % об.;
- $\pm 0,04$ % об. при концентрации воздуха в масле 1,0 % об. ;
- $\pm 0,30$ % об. при концентрации воздуха в масле 10,0 % об.

Систематическая составляющая суммарной погрешности имеет отрицательный знак. Из-за ограниченного времени анализа измеренная концентрация воздуха в масле меньше действительной на величину этой погрешности и составляет:

- а) -0,0004 % об. при концентрации воздуха в масле 0,1 % об.;
- б) -0,0043 % об. при концентрации воздуха в масле 1,0 % об.;
- в) -0,0432 % об. при концентрации воздуха в масле 10,0 % об.

Систематической погрешностью можно пренебречь из-за незначительности ее величины. Кроме того, при градуировке измерителя «Иркут» поверочными смесями эта погрешность исключается, а при градуировке введением доз воздуха уменьшается в пять раз.

Таким образом, основная суммарная погрешность измерителя определяется только случайными составляющими.

При нормировании в эксплуатационной документации пределов допускаемой погрешности следует закладывать 1,25 – 2,5– кратный запас для обеспечения метрологической надежности на период эксплуатации прибора, поэтому для измерителя «Иркут» нормированы следующие пределы основной абсолютной погрешности:

- $\pm 0,1$ % об. в диапазоне объемной доли воздуха в масле от 0,1 до 1,0 % об.;
- $\pm 0,5$ % об. в диапазоне объемной доли воздуха в масле свыше 0,1 до 12,0 % об.

В пятой главе рассмотрена конструкция измерителя объемной доли воздуха в трансформаторном масле «Иркут», который был разработан на базе проведенных исследований и в настоящее время является серийной продукцией. Приведены технические характеристики прибора. Показано, каким образом решены вопросы метрологического обеспечения. В заключении даны рекомендации, реализация которых позволит улучшить характеристики прибора и расширить область применения десорбционно-термокондуктометрического метода измерений. Проведение соответствующих исследований ДТКМ позволяет создать приборы для измерения газов, растворенных в органических жидкостях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен и исследован десорбционно-термокондуктометрический метод измерения концентрации воздуха, растворенного в трансформаторном масле, позволяющий создать простой, удобный в работе прибор, удовлетворяющий по метрологическим характеристикам требованиям электроэнергетики.

2. Разработана схема и собрана установка, реализующая десорбционно-термокондуктометрический метод измерения объемной доли воздуха в масле.

3. Аналитически получена и экспериментально подтверждена математическая модель статической характеристики измерителя на базе ДТКМ.

4. Выведены аналитические зависимости для чувствительности и нижнего предела измерений объемной доли воздуха в масле.

5. Определена и экспериментально подтверждена математическая связь между временем анализа, динамическими характеристиками элементов измерителя и погрешностью измерений, что позволяет выбирать оптимальное время анализа. Показано влияние на динамические характеристики конструктивных параметров измерителя.

6. Определены составляющие суммарной погрешности измерителя, проведена их оценка и выявлены факторы, вносящие наибольший вклад в суммарную погрешность.

7. Сравнение экспериментально полученных выходных сигналов ТКЯ с рассчитанными теоретически показало удовлетворительное их совпадение, что подтверждает справедливость допущений, принятых при выводе аналитических зависимостей.

8. На базе теоретически полученных зависимостей и экспериментальных данных предложены технические решения по проектированию приборов для измерения концентрации воздуха в трансформаторном масле с заданными метрологическими характеристиками.

9. Разработано и утверждено актом государственных испытаний метрологическое обеспечение прибора, позволяющее обходиться без дорогостоящих эталонных проб масла с заданной концентрацией воздуха.

10. На базе проведенных исследований осуществлена разработка измерителя объемной доли воздуха в трансформаторном масле «Иркут», в 2000 году успешно проведены государственные испытания для целей присвоения измерителю типа средств измерений. Прибор зарегистрирован в Госреестре средств измерений (№ 20375-00) и в 2001 году на базе ОАО «Ангарское ОКБА» освоен серийный выпуск приборов.

11. Сформулированы задачи исследований по расширению области применения ДТКМ с целью создания на его основе новых типов приборов.

Основные положения работы отражены в следующих публикациях:

1. Воронова Т.С.Б Иващенко В.Е., Пирог В.П., Кузнецов Б.Ф. Десорбционно-термокондуктометрический анализатор концентрации растворенных газов в трансформаторном масле // Совр. технологии и науч.-техн. прогресс: Тез. докл. науч.-техн. конф.- . Ангарск, АГТА, 2001.- 78 с.
2. Воронова Т.С., Иващенко В.Е., Кузнецов Б.Ф., Пинхусович Р.Л. Десорбционно-термокондуктометрический метод определения концентрации воздуха в трансформаторном масле // Приборы, 2001, № 12, с. 16-20.
3. Иващенко В.Е., Савкун Л.З., Воронова Т.С., Рубцов А.В. Прибор для определения общего газосодержания в трансформаторном масле// Электрические станции, 2002, № 4, с. 107-108.
4. Иващенко В.Е., Савкун Л.З., Воронова Т.С., Дрянов А.Н. Измеритель объемной доли газов в трансформаторном масле – ИРКУТ// Теплоэнергетика, 2002, №3, с. 72-73.
5. Воронова Т.С., Иващенко В.Е., Кузнецов Б.Ф., Пинхусович Р.Л. Анализ метрологических параметров измерителя концентрации воздуха в масле// Совр. технологии и науч.-техн. прогресс: Тез. докл. науч.-техн. конф.- . Ангарск, АГТА, 2002.- 130 с.