

Санников Максим Анатольевич

**ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ
МОДУЛЬ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
КАНАЛАМИ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ**

**Специальность
05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Самара 2007 г.

Работа выполнена на кафедре конструирования и производства радиоэлектронных средств Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва» (СГАУ)

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Зеленский Анатолий Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Стеблев Юрий Иванович,
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет»

кандидат технических наук, доцент
Абаимов Михаил Александрович,
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва», кафедра электротехники

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-исследовательский институт «Экран», г. Самара

Защита состоится 30 ноября 2007 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д212.215.05 при СГАУ по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан 29 октября 2007 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



А.А. Калентьев

Актуальность работы. Ежегодно увеличивается количество стальных подземных газопроводов, срок эксплуатации которых превысил 40 лет. По правилам безопасности, такие газопроводы должны быть подвергнуты технической диагностике, с целью определения остаточного срока службы. Заключение об остаточном сроке службы выносится в соответствии инструкцией по диагностированию технического состояния стальных подземных газопроводов на основе результатов измерений физических характеристик металла труб, геометрических размеров труб и изоляционного покрытия газопровода. В настоящее время измерения выполняются различными переносными электронными приборами: толщиномерами, твердомерами, дефектоскопами и др., в полевых условиях, в шурфах, в ограниченном пространстве на глубине 1...2 метра. В таких условиях их количество, габариты и масса играют важную роль. После проведения измерений, полученные данные вручную или полуавтоматически переносятся на компьютер для выполнения технических расчётов и принятия решения о дальнейшей эксплуатации газопровода, а также для оформления официального заключения. Эти операции занимают достаточно много времени и подвержены влиянию «человеческого фактора». Ошибка при измерениях или в расчётах выливается в крупные экономические потери.

На ответственных участках газопровода, пересекающих автотрассы, железнодорожные пути и водные преграды устанавливаются телеметрические системы управления каналами газоснабжения, в которых существует потребность в достоверном источнике информации, однозначно характеризующим состояние газопровода и его остаточный ресурс.

Существующие средства диагностики имеют вышеперечисленные недостатки и не полностью удовлетворяют сложившимся требованиям практики, поэтому актуальной задачей является создание комплексного диагностического вихретокового модуля (ВТМ) с малыми массогабаритными показателями, который позволит максимально сократить количество необходимого оборудования, повысить точность измерений, значительно упростить и ускорить процесс диагностики, а также сможет использоваться в автоматизированных системах управления каналами газоснабжения в качестве источника информации о состоянии газопровода.

Целью работы является расширение функциональных возможностей и повышение точности вихретоковых измерительных модулей для систем диагностики и управления каналами газоснабжения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить, следующие задачи:

- провести анализ различных физических принципов, методов и средств неразрушающего контроля и диагностики стальных газопроводов с целью нахождения физического метода, позволяющего определять наибольшее число параметров, необходимых для расчёта остаточного срока службы;
- разработать математическую модель влияния кривизны поверхности газопровода на результаты измерения вихретоковых приборов, для повышения точности измерения толщины стенки труб и толщины изоляционного покрытия на газопроводе, а также для автоматизации определения диаметра газопровода;
- разработать методику автоматизированного бесконтактного определения диаметра стального газопровода с помощью ВТМ;

- разработать базовый вариант ВТМ для систем управления каналами газоснабжения, обеспечивающего высокую точность, многофункциональность, широкий диапазон измерений, автоматизацию и простоту диагностики при малых массогабаритных показателях для полевых условий эксплуатации;
- разработать программное обеспечение для систем управления каналами газоснабжения, построенных на базе ВТМ;
- разработать экспериментальную установку и провести исследования с образцами вихретоковых преобразователей, для корректировки разработанной математической модели.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- проведён анализ различных физических принципов, методов и средств неразрушающего контроля и диагностики стальных газопроводов с целью определения базовых требований к ВТМ для определения остаточного срока службы газопровода, рассмотрены мешающие факторы и методы их компенсации;
- разработана математическая модель влияния кривизны поверхности газопровода на результаты измерения ВТМ, которая позволила повысить точность измерения толщины стенки труб и толщины изоляционного покрытия на газопроводе, а также позволила автоматизировать процесс определения диаметра газопровода;
- предложен и реализован метод повышения точности определения остаточного срока службы газопровода, с помощью программного решения уравнений старения металла трубы, вместо субъективного графического метода решения;
- разработано программное обеспечение ВТМ для систем управления каналами газоснабжения, позволяющее комплексно автоматизировать расчёт остаточного срока службы газопровода, который выступает в качестве основного управляющего критерия в системах управления каналами газоснабжения;
- разработан базовый вариант автоматизированного ВТМ на базе современной микропроцессорной техники для полевых условий эксплуатации.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

- определены базовые требования к ВТМ для определения остаточного срока службы газопровода на основе проведенного анализа различных физических принципов, методов и средств неразрушающего контроля и диагностики;
- построенная математическая модель, позволила повысить точность измерения толщины стенки труб и толщины изоляционного покрытия на газопроводе, за счёт учёта влияния кривизны поверхности газопровода;
- разработанный метод для нахождения диаметра трубы газопровода с помощью ВТМ позволил создать автоматизированное средство измерения диаметра трубы газопровода с неполным доступом;
- предложенный, вместо субъективного графического метода, метод программного решения уравнений старения металла трубы, позволил повысить точность определения остаточного срока службы газопровода;
- разработанное программное обеспечение ВТМ для систем управления каналами газоснабжения, позволило комплексно автоматизировать расчёт остаточного срока службы газопровода, который выступает в качестве основного управляющего критерия в системах управления каналами газоснабжения;

- разработанный базовый вариант реализации ВТМ для систем управления каналами газоснабжения, на базе современной микропроцессорной техники позволил сократить количество необходимого оборудования для проведения диагностики в полевых условиях;
- созданная экспериментальная установка и проведённые исследования с образцами вихретоковых преобразователей подтвердили правильность разработанной математической модели.

Реализация и внедрение результатов работы. Представленные в работе исследования и разработки реализованы в ВТМ и программном обеспечении для систем управления каналами газоснабжения и определения остаточного срока службы стальных газопроводов, внедрены в следующих организациях:

1. ОАО «Самарагаз» филиал ООО «Средневожская Газовая Компания», г. Самара;
2. ООО ЮУРПЦ «Промбезопасность», г. Челябинск;
3. Самарское управление Госгортехнадзора России, г. Самара;
4. ООО «Экспертиза Плюс», г. Архангельск;
5. ООО «Уралнефтегазпромсервис», Башкортостан, г. Октябрьский;
6. ООО «Городской центр экспертиз – Север», г. Санкт – Петербург;
7. ООО «Центр научно-инженерных и производственных работ по технической безопасности», республика Коми, г. Ухта.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на НТС СГАУ, международном симпозиуме «Надёжность и качество 2004» в г. Пенза, всероссийской научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления и обработки информации» в г. Уфа, 2003 г., международной студенческой научной конференции «Туполевские чтения» в г. Самара, 2005 г.

Основные положения, выносимые на защиту:

- математическая модель влияния кривизны поверхности стального газопровода на результаты измерения ВТМ;
- автоматизированный бесконтактный метод определения диаметра газопровода при неполном доступе с помощью ВТМ;
- экспериментальные исследования, подтверждающие, достоверность разработанной математической модели;
- способы и технические средства реализации ВТМ для систем управления каналами газоснабжения на базе современной микропроцессорной техники и сопряжения ВТМ с компьютером;
- программное обеспечение для систем управления каналами газоснабжения, комплексно автоматизирующее расчёт остаточного срока службы стальных газопроводов.

Публикации. По результатам выполненных исследований лично и в соавторстве опубликовано 13 работ, из них опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определённых Высшей аттестационной комиссией – 5.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, перечня используемых источников, приложений. Работа содержит 172 страницы машинописного текста, 15 таблиц, 56 иллюстраций, 7 страниц библиографического списка из 95 наименований и 16 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи научных исследований.

В первой главе рассмотрены требования систем управления каналами газоснабжения к определению остаточного ресурса газопровода и существующая методика определения остаточного срока службы стальных газопроводов. Анализ показал, что за остаточный срок службы газопровода принимается минимальное значение из остаточных сроков службы, рассчитанных по каждому из следующих параметров: 1) пластичность металла труб; 2) ударная вязкость металла труб; 3) напряжённо-деформированное состояние (НДС) при наличии фронтальной коррозии; 4) локальное НДС в местах коррозионных язв. Расчёты перечисленных сроков службы, изложенные в РД 12-411-01 "Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов", весьма объёмны, и поэтому здесь не приводятся. Выявлены недостатки существующей реализации данной методики, среди которых: использование обширного парка приборов (большие габариты и стоимость), ручная обработка измерений, ручной сбор справочной информации и отсутствие автоматизации технических расчётов.

Для решения перечисленных задач был проведён сравнительный анализ методов и средств неразрушающего контроля и диагностики (НКиД) с целью обоснования выбора метода НКиД, который позволит произвести измерение наибольшего количества параметров, необходимых для расчёта остаточного срока службы, что позволит максимально сократить количество используемых приборов. В связи с этим рассмотрена классификация дефектов и методов их выявления. Анализ показал, что ни один из методов и приборов не является универсальным и не может удовлетворить в полном объеме требования практики, в связи с этим существует и используется довольно большой парк оборудования. Однако анализ выявил, что рациональным, в качестве базового метода будет использование вихретокового метода НКиД. На результаты измерений, выполненных с помощью вихретоковых средств НКиД, оказывают влияние ряд мешающих факторов, большинство из которых хорошо изучены и успешно компенсируются. Однако один из них - искажение результатов из-за кривизны поверхности, влияющий на измерение таких параметров как толщина стенки и диаметр газопровода, сравнительно мало изучен и на практике учитывается с помощью экспериментальных коэффициентов. В связи с этим возникла задача разработки математической модели учета влияния кривизны поверхности на результаты измерения ВТМ, а также её техническое приложение в средствах НКиД.

Также, в главе рассмотрена классификация, конструкции и области использования вихретоковых датчиков, а также их основные параметры. Проведён анализ структурных схем вихретоковых модулей различных приборов НКиД, выявлены общие элементы и предложена унифицированная структурная схема вихретокового измерительного модуля, позволяющего производить измерение нескольких параметров: толщины стенки, толщины изоляции, диаметра газопровода (рис.1).

Рассмотрена существующая математическая модель катушки прямоугольного сечения и вносимого сопротивления, описывающая взаимодействие вихретокого датчика и плоской проводящей поверхности, а также методика расчёта и наиболее важные зависимости, описывающие основные свойства вихретокого датчика.

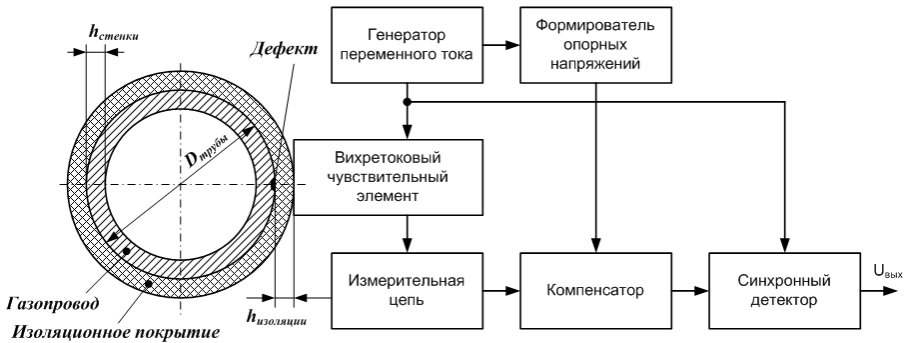


Рисунок 1 – Унифицированная структурная схема вихретокового измерительного модуля

Проведён анализ существующих теоретических работ в области НКИД, в частности работ Герасимова В.Г., Ключева В.В., Шатерникова В.Е., Стеблева Ю.И., Шкарлета Ю.М., Меркулова А.И., Ляченкова Н.В. и применительно к трубопроводам Дорофеева А.Л., Никитина А.И., Рубина А.Л. Показаны недостатки и ограничения предложенных ими методов и моделей учёта влияния кривизны поверхности.

Во второй главе описана разработка математической модели влияния кривизны поверхности трубопровода на результаты измерения вихретоковым модулем. Для упрощения построения математической модели в качестве вихретокового датчика была выбрана катушка индуктивности квадратного сечения, поскольку, в этом случае, форма и размеры сечения постоянны в независимости от координаты, в отличие от катушки круглого сечения. Известно, что зависимость вносимого сопротивления от величины зазора между катушкой индуктивности и поверхностью электропроводящего элемента с достаточной для практики точностью, аппроксимируется следующим соотношением:

$$Z_{вн.пл} = Z_{max} \cdot \exp\left(-\frac{6(h-0,7\delta)}{D_k}\right), \quad (1)$$

где Z_{max} – максимальное значение модуля вносимого сопротивления, при минимально возможном зазоре; h – расстояние между катушкой индуктивности и плоской поверхностью электропроводящего элемента; D_k – диаметр катушки индуктивности; δ – глубина проникновения вихревых токов.

Рассмотрение рисунка катушки индуктивности над поверхностью газопровода (рис.2), показало, что кривизна поверхности трубы, соответствует изменению зазора по одной координате для катушки индуктивности с квадратным сечением.

На основе геометрических рассуждений, получено уравнение, описывающее вносимое сопротивление $Z_{вн}(x)$, в зависимости от координаты, с учетом функции изменения зазора по сечению:

$$Z_{вн}(x) = Z_{max} \cdot \exp\left(-\frac{6(H_{min} + (R_{mp} - \sqrt{R_{mp}^2 - x^2}) - 0,7\delta)}{D_k}\right), \quad (2)$$

где R_{mp} – радиус трубы; H_{min} – минимальное значение зазора между трубой и катушкой

индуктивности, на перпендикуляре к основанию катушки, проходящем через центр трубы; x – координата по сечению трубы с началом в месте пересечения перпендикуляра к основанию катушки, проходящему через центр трубы.

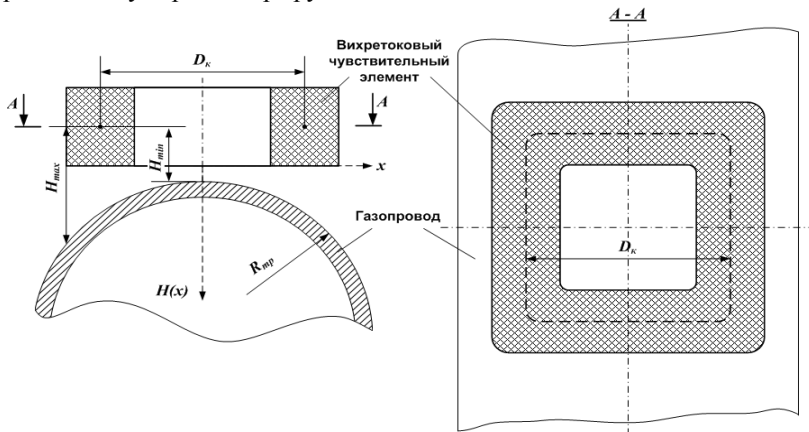


Рисунок 2 – Расположение датчика ВТМ над поверхностью газопровода

Для решения поставленной задачи предложено воспользоваться средним эквивалентным значением величины зазора, т.е. найти усредненное значение зазора по координате x , в пределах от $-D_k/2$ до $+D_k/2$ (непосредственно “под катушкой”):

$$H_{\text{экв}} = H_{\text{мин}} + \frac{2 \int_0^{D_k/2} (R_{\text{мп}} - \sqrt{R_{\text{мп}}^2 - x^2}) dx}{D_k} \quad (3)$$

В результате получено выражение, вносимого сопротивления, с учётом влияния кривизны поверхности трубы газопровода:

$$Z_{\text{вн.экв}} = Z_{\text{макс}} \cdot \exp \left(-\frac{6}{D_k} \cdot \left(H_{\text{мин}} + R_{\text{мп}} - \frac{R_{\text{мп}}^2}{D_k} \left(\arcsin \left(\frac{D_k/2}{R_{\text{мп}}} \right) + \frac{D_k/2}{R_{\text{мп}}} \sqrt{1 - \left(\frac{D_k/2}{R_{\text{мп}}} \right)^2} \right) - 0,7\delta \right) \right) \quad (4)$$

Для практической оценки влияния кривизны построен график зависимости изменения $Z_{\text{вн.экв}}$ относительно вносимого сопротивления катушки расположенной над бесконечной проводящей плоскостью, который показал, что только при размере катушки индуктивности в 10 раз меньшем диаметра трубы, различие между вносимым сопротивлением составляет 5%. При равных размерах оно достигает 48%. Очевидно, что такое значение погрешности измерения неприемлемо и необходимо искать способы её компенсации.

Оценка погрешности замены реального зазора эквивалентным зазором $H_{\text{экв}}$ показала, что при равных размерах катушки индуктивности и газопровода, погрешность замены $H_{\text{экв}}$ составляет 16%. Хотя уже при соотношении 2:1 (диаметр трубы / диаметр катушки) значение погрешности снижается до 3%, что достаточно для технических расчётов. Однако, если использовать вихретоковый датчик для определения диаметра трубы (а этот параметр также является исходным для расчёта остаточного срока службы), то погрешность в начале

диапазоне измерения неприемлемо велика, поэтому необходимо решить поставленную задачу более точно.

Для этого найдём интеграл от функции (2) и вычтем его из функции вносимого сопротивления плоскости. Показано, что ввиду симметричности функции, оценить влияние кривизны поверхности на вносимое сопротивление можно по следующей формуле:

$$\Delta Z_{\text{вн}} = \frac{\frac{D_k}{2} - \int_0^{\frac{D_k}{2}} \exp\left(-\frac{6(H_{\min} + (R_{mp} - \sqrt{R_{mp}^2 - x^2}) - 0,7\delta)}{D_k}\right) dx}{D_k / 2} \cdot 100\% \quad (5)$$

Из-за того, что переменная интегрирования находится под знаком радикала в показателе степени экспоненты не представляется возможным математическое решение интеграла, поэтому он был рассчитан численными методами, на персональном компьютере. Для аналитического решения подынтегральная функция (5) была разложена в степенной ряд Маклорена, для того, чтобы затем можно было воспользоваться теоремами интегрирования степенных рядов. Для выбора оптимального количества членов ряда с целью получить приемлемую точность аппроксимации и в тоже время не усложнить конечные выражения, было предложено разложить исходную функцию в степенной ряд с семью членами. Дальнейший анализ показал, что наиболее приемлемым будет использовать разложение с 4 членами ряда:

$$Z_{\text{вн. ряд}} = Z_{\text{max}} \cdot \exp\left(-\frac{6(H_{\min} - 0,7\delta)}{D_k}\right) \cdot \left[1 - \frac{3 \cdot x^2}{R_{mp} \cdot D_k} - \frac{3 \cdot x^4 \cdot (D_k - 6R_{mp})}{4 \cdot R_{mp}^3 \cdot D_k^2}\right] \quad (6)$$

Оценка погрешность аппроксимации $Z_{\text{вн}}(x)$ степенным рядом $Z_{\text{вн. ряд}}$ показала, что при 4 членах степенного ряд, погрешность аппроксимации не превышает 0,0015%. Такое значение погрешности аппроксимации необходимо для того, чтобы общая погрешность математической модели не превысила 5%. Далее был взят интеграл от полученного степенного ряда, на промежутке от 0 до $D_k/2$. После преобразования, подставив результат в (5) получено выражение:

$$Z_{\text{вн.}}(R_{mp}) = \frac{2}{D_k} \cdot Z_{\text{max}} \cdot \left[D_k \cdot \frac{320 \cdot R_{mp}^3 - 80 \cdot D_k \cdot R_{mp}^2 + 18 \cdot D_k^2 \cdot R_{mp} - 3 \cdot D_k^3}{640 \cdot R_{mp}^3} \cdot \exp\left(-\frac{6(H_{\min} - 0,7\delta)}{D_k}\right) \right] \quad (7)$$

Оценка расхождения интеграла от степенного ряда с численно решённым интегралом на компьютере, показала, что погрешность составляет около 4%, что в 4 раза лучше ранее полученного результата.

Далее, на основе требований практики, был рассмотрен случай, когда вихретоковый датчик расположен под углом α относительно поверхности трубы. Аналогично предыдущему случаю, на основе геометрических рассуждений, получено уравнение, описывающее вносимое сопротивление $Z_{\text{вн}}(x)$, в зависимости от координаты, с учетом функции изменения зазора по сечению и углом наклона α :

$$Z_{\text{вн}}(x) = Z_{\text{max}} \cdot \exp\left(-\frac{6(H_{\min} + x \cdot \text{tg} \alpha + R_{mp} - \sqrt{R_{mp}^2 - x^2}) - 0,7\delta)}{D_k}\right) \quad (8)$$

где α – угол наклона датчика относительно горизонтальной оси газопровода x .

Относительное изменение $Z_{вн.}$ для $R_{mp} = 13$ мм, $D_k = 20$ мм, $H_{min} = 6$ мм представлено на рис. 3. Здесь следует заметить, что при наклоне датчика эффективная площадь катушки над поверхностью трубы формально уменьшается. И поэтому зазор измеряется от $(-D_k/2) \cdot \cos \alpha$ до $(+D_k/2) \cdot \cos \alpha$. Однако, в реальных условиях электромагнитное взаимодействие катушки с трубой происходит и через “боковую” сторону датчика, и при малых углах наклона уменьшения вносимого сопротивления за счёт уменьшения площади под катушкой почти не наблюдается. В связи с этим, при малых углах наклона, рекомендуется измерять зазор от $-D_k/2$ до $+D_k/2$.

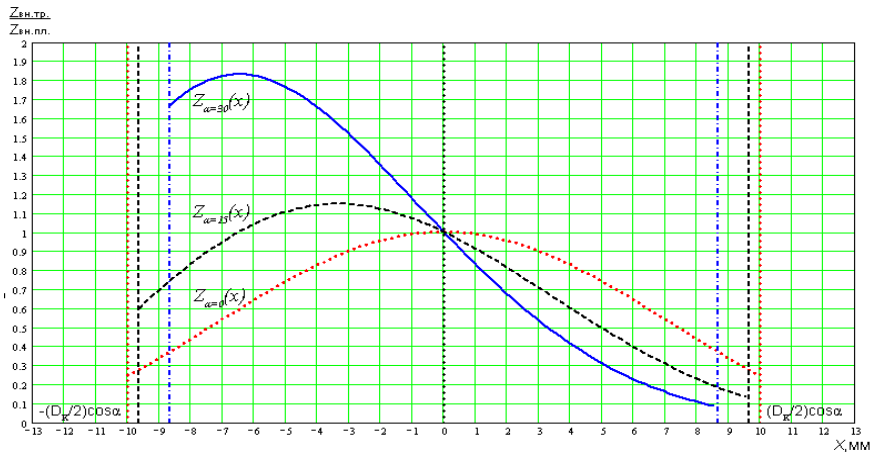


Рисунок 3 – Относительное изменение $Z_{вн.}$ при наклоне датчика $\alpha = 0^\circ, \alpha = 15^\circ, \alpha = 30^\circ$

Из рисунка 3, видно, что вносимое сопротивление для конкретной катушки индуктивности, наклоненной на угол α будет определяться как:

$$\Delta Z_{вн} = \frac{\int_{-\frac{D_k}{2} \cos \alpha}^{\frac{D_k}{2} \cos \alpha} Z_{max} \cdot \exp\left(-\frac{6(H_{min} + x \cdot \operatorname{tg} \alpha + R_{mp} - \sqrt{R_{mp}^2 - x^2}) - 0,7\delta}{D_k}\right) dx}{D_k \cos \alpha} \quad (9)$$

Далее действия были аналогичны случаю при $\alpha = 0^\circ$: разложение подынтегральной функции в степенной ряд Маклорена и взятие интеграла от этого ряда. В результате получено выражение:

$$Z_{вн}(R_{mp}, \alpha) = Z_{max} \exp\left(-\frac{6(H_{min} - 0,7\delta)}{D_k}\right) \cdot \frac{1016R_{mp}^3 - 296R_{mp}^2 \cdot D_k \cos^2 \alpha - 912R_{mp}^3 \cos^2 \alpha - 3D_k^3 \cos^4 \alpha + 18R_{mp} D_k^2 \cos^4 \alpha + 216R_{mp}^2 \cdot D_k \cdot \cos^4 \alpha + 216R_{mp}^3 \cos^4 \alpha}{320R_{mp}^3} \quad (10)$$

Исследования показали, что погрешность аппроксимации не превышает 5%, в диапазоне изменения угла от 0 до 90 градусов и изменении соотношения диаметра трубы к размеру катушки от 1 до 10.

В третьей главе описано практическое применение разработанной математической модели, и разработка стенда для проведения экспериментальных исследований, которые

подтвердили возможность использования предложенных технических решений в реальном ВТМ.

На основе разработанной модели предложен бесконтактный метод определения диаметра трубы, состоящий из нескольких этапов. На первом этапе выполняется измерение $Z_{\text{вн.лз}}$ с помощью катушки индуктивности малого диаметра, который меньше диаметра трубы и соответственно на такой датчик кривизна поверхности не оказывает влияния. Далее производится измерение $Z_{\text{вн}}(R_{\text{мп}})$, с помощью катушки большого диаметра, сравнимого с диаметром трубы. Затем, поделив $Z_{\text{вн}}(R_{\text{мп}})$ на $Z_{\text{вн.лз}}$ получаем следующее выражение (для случая $\alpha = 0^0$):

$$\frac{Z_{\text{вн}}(R_{\text{мп}})}{Z_{\text{вн.лз}}} = D_k \cdot \frac{320 \cdot R_{\text{мп}}^3 - 80 \cdot D_k \cdot R_{\text{мп}}^2 + 18 \cdot D_k^2 \cdot R_{\text{мп}} - 3 \cdot D_k^3}{640 \cdot R_{\text{мп}}^3} \quad (11)$$

Подставив в (11) результаты измерения и D_k , и решив получившееся кубическое уравнение методом Виета-Кардо можно найти непосредственно значение $R_{\text{мп}}$. По аналогии, определяется $R_{\text{мп}}$ при наличии угла наклона датчика α , при этом вместо функции $Z_{\text{вн}}(R_{\text{мп}})$ (7) берётся функция $Z_{\text{вн}}(R_{\text{мп}}, \alpha)$ (10).

Ещё одно применение разработанной модели - это программная компенсация влияния кривизны поверхности с целью повышения точности и достоверности измерения других параметров: толщины изоляционного покрытия и толщины стенки. Покажем это на примере компенсации кривизны поверхности при измерении толщины изоляции. Выразим из (11) величину зазора между трубой и катушкой:

$$H(Z_{\text{вн}}) = \frac{-D_k}{6} \cdot \ln \left(\frac{Z_{\text{вн}}}{Z_{\text{max}}} \cdot \frac{640 \cdot R_{\text{мп}}^3}{2 \cdot (320 \cdot R_{\text{мп}}^3 - 80 \cdot D_k \cdot R_{\text{мп}}^2 + 18 \cdot D_k^2 \cdot R_{\text{мп}} - 3 \cdot D_k^3)} \right) + 0,7\delta \quad (12)$$

Теперь зная диаметр (радиус) трубы, и подставив его в (12) мы можем определить реальный зазор между датчиком и поверхностью трубы, на основании замера $Z_{\text{вн}}$, что эквивалентно толщине изоляционного покрытия. Аналогично можно определить толщину изоляции в случае наклона датчика.

Разработанная математическая модель позволяет повысить точность и расширить функциональность существующих средств НКВД. Это показано на примере двухчастотного амплитудного толщиномера. В нём для отстройки от влияния зазора при измерении толщины стенки применяется двухчастотный амплитудный метод. Прибор имеет генераторы низкой и высокой частоты. Отстройка от влияния зазора достигается благодаря тому, что закономерность напряжения на выходе высокочастотного канала с помощью его усилителя устанавливается такой, чтобы коэффициент усиления измерительного (низкочастотного) канала при этом оставался неизменным. При увеличении зазора вносимое сопротивление убывает по закону, близкому к экспоненциальному $U(h) = a \cdot \exp(-b \cdot h)$, где $U(h)$ - действующее значение напряжения рассогласования моста; a и b - постоянные коэффициенты, полученные на основе экспериментальных данных. Коэффициенты a и b подбираются опытным путём и отличаются в зависимости от частоты, диаметра трубы и толщины стенки. Разработанная математическая модель позволяет уйти от подбора коэффициента в зависимости от диаметра трубы, поскольку теперь эта зависимость описывается математически. Кроме

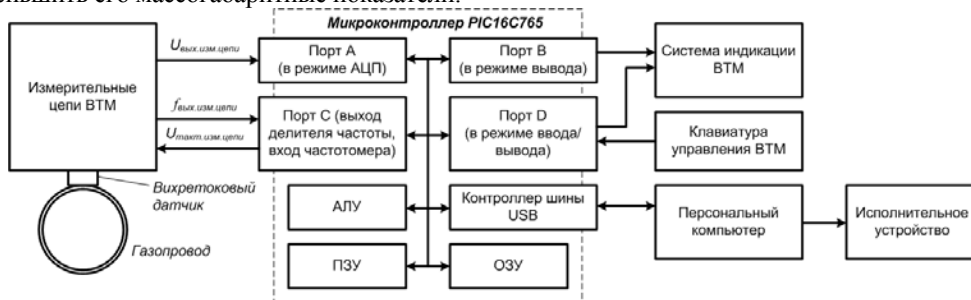
этого, также можно учесть угол наклона датчика, относительно оси газопровода и тем самым повысить точность измерения толщины стенки.

Для подтверждения полученных теоретических результатов проведён ряд экспериментальных исследований, которые доказали правильность полученных теоретических зависимостей. Для экспериментов были рассчитаны и сделаны три катушки индуктивности квадратного сечения, с размерами 5, 10, 20 мм. Во время эксперимента вихретоковые датчики размещались вертикально над поверхностью отрезка стальной трубы (Ст.20) газопровода диаметром 25 мм (толщина стенки 2,8 мм) и 108 мм (толщина стенки 3,5 мм) и над плоскими стальными листами аналогичной толщины. Соотношение размеров стального листа и диаметра катушки, позволило нам пренебречь влиянием края и условно считать лист бесконечной плоской поверхностью.

Выходные характеристики $Z_{вн}(h)$ катушек, расположенных над стальным листом и трубой, показали, что полученные теоретические выражения хорошо коррелируют с результатами экспериментов.

В четвёртой главе изложено проектирование и разработка ВТМ для систем управления каналами газоснабжения. Рассмотрены различные схмотехнические решения при построении измерительных цепей ВТМ. Подробно рассмотрена реализация параметрических, трансформаторных и автогенераторные измерительных схем включения вихретокового датчика. Показано, что выходной сигнал вихретокового датчика имеет сравнительно малую глубину информационной модуляции выходного параметра. По этой причине вихретоковые датчики включают в мостовые или дифференциальные измерительные цепи. Которые в свою очередь имеют, такой недостаток как, наличие напряжения на выходе, при удалении датчика от электропроводящего элемента, возникающего в результате не идентичности реальных катушек индуктивности. В связи с этим, рассмотрена схема прямоугольно-координатного компенсатора, для подавления остаточного выходного напряжения. В результате проведенного анализа схмотехнических приемов выявлено, что наибольшей простотой, надёжностью и помехозащищённостью обладает мостовая измерительная цепь с параметрическим вихретоковым чувствительным элементом.

На основе вышеизложенного был предложен базовый вариант технической реализации ВТМ для систем управления каналами газоснабжения (рис. 4). С измерительной цепи вихретокового датчика выходной сигнал поступает на порт А микроконтроллера PIC16C765, который работает в режиме входа АЦП. Микроконтроллер имеет встроенный контроллер шины USB, что упростило реализацию соединения устройства с компьютером и позволило уменьшить его массогабаритные показатели.



Порты В и D микроконтроллера используются для управления элементами индикации и устройством ввода, которые позволяют контролировать и управлять процессом измерения, записи данных в память и переноса их на ПК. Операции ввода/вывода порта D разделены во времени. Порт С работает как выход делителя тактовой частоты для измерительной цепи и вход измерителя частоты. Это позволяет использовать в качестве источника сигнала две различные измерительные цепи: мостовую и автогенераторную, что позволяет охватить максимальный диапазон измерения различных физических параметров газопровода. Микроконтроллер производит минимальную обработку данных, поскольку она осуществляется после их переноса на ПК. Это позволяет гибко и оперативно модифицировать программное обеспечение (ПО), значительно упростить и удешевить аппаратную часть устройства, а также повысить надёжность и ускорить расчёты.

Поскольку на практике измерение таких параметров как толщина стенки, толщина изоляционного покрытия и диаметр газопровода производится в широком диапазоне, то предложена конструкция ВТМ со сменными измерительными головками. Головка состоит из 2-х коаксиально расположенных катушек (для измерения диаметра) и оснащена системой автоматического определения при подключении её к ВТМ.

Во второй части четвёртой главы описывается разработка ПО ВТМ для систем управления каналами газоснабжения. Проведён анализ, на основе которого разработана структура ПО ВТМ, включающая в себя программы управления работой отдельных блоков (программы компенсации начального напряжения вихретоковых датчиков, установки частоты генератора, калибровки по образцам, проверки работоспособности и т.д.) и программы обработки данных (программы хранения и доступа к массивам данных, решения систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений, статистической обработки серии измерений и т.д.)

Анализ показал, что наиболее актуальной является разработка программного обеспечения аппаратной части ВТМ для систем управления каналами газоснабжения и ПО технических расчётов, поскольку оно наиболее специфично. Последнее зависит от предметной области автоматизации. В нашем случае данное ПО может использоваться как в составе автоматизированного ВТМ, так и отдельно. В первом случае исходные данные для расчётов автоматически поступают из базы данных результатов измерений ВТМ. Во втором, данные вводятся вручную на основе замеров других приборов, основанных на различных физических принципах, будь то вихретоковый эффект, ультразвук и т.д. После изучения предметной области было разработано ПО ВТМ для систем управления каналами газоснабжения, комплексно автоматизирующее четыре расчёта, изложенные в РД 12-411-01, и позволяющее определять остаточный срок службы, с погрешностью, не превышающей ± 1 год. ПО разработано в среде Borland Delphi и функционирует на компьютерах с процессором класса Intel Pentium и выше, и операционной системой Microsoft Windows 2000/XP/2003/Vista.

Основные результаты работы:

- Проведён анализ различных физических принципов, методов и средств неразрушающего контроля и диагностики стальных газопроводов, на основе которого определены базовые требования к ВТМ систем управления каналами газоснабжения, рассмотрены мешающие факторы и методы их компенсации.
- Разработана математическая модель, позволившая повысить точность измерения толщины стенки трубы и толщины изоляционного покрытия на газопроводе на 5-38% в зависимости от соотношения размеров датчика и трубы.
- Предложен метод определения диаметра газопровода на основе разработанной математической модели влияния кривизны поверхности газопровода на результаты измерения ВТМ, который позволяет создавать бесконтактные автоматизированные средства измерения диаметра трубы газопровода с неполным доступом.
- Созданы образцы вихретоковых преобразователей ВТМ и экспериментальный стенд, с помощью которых исследована погрешность разработанной математической модели, в среднем не превышающая 4,9% .
- Предложен и реализован метод повышения точности определения остаточного срока службы газопровода, с помощью программного решения уравнений старения металла трубы, уменьшивший погрешность определения до ± 1 года, вместо субъективного графического метода решения.
- Разработан базовый вариант ВТМ на базе современной микропроцессорной техники для полевых условий эксплуатации позволивший сократить количество необходимого оборудования для проведения диагностики.
- Разработано программное обеспечение, комплексно автоматизирующее расчёт остаточного срока службы стальных газопроводов, которое позволяет значительно ускорить и упростить процесс расчёта.

Список публикаций по теме диссертации:

в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией:

1. Санников М.А. Влияние кривизны поверхности трубопровода при диагностике вихретоковыми приборами. // Контроль. Диагностика. – М.: Машиностроение. – 2006. – №5 (95). – С. 24-27.
2. Санников М.А. Программный комплекс для расчёта остаточного срока службы стальных подземных газопроводов. // Безопасность труда в промышленности. – М.: НТЦ Промышленная безопасность. – 2004. – №12. – С. 23-24.
3. Санников М.А. Мобильная информационная система для диагностики газопроводов в полевых условиях. // Контроль. Диагностика. – М.: Машиностроение. – 2003. – №7(61). – С. 23-25.
4. Санников М.А. Программный комплекс «Ресурс газопровода». // Газовая промышленность. – М.: Газоил пресс. – 2007. – №7. – С. 43-45.
5. Санников М.А. Программа расчёта для стального подземного газопровода остаточного срока службы по пластичности. // Контроль. Диагностика. – М.: Машиностроение. – 2005. – №1 (79). – С. 34-35.

в других изданиях:

6. Санников М.А., Зеленский А.В. Бесконтактный вихретоковый измеритель диаметра трубы газопровода. Самар. госуд. аэрокомич. ун-т. – Самара, 2007. – 4 с. – Деп. в ВИНТИ Рос. акад. наук 27.07.2007, № 784-B2007.
7. Санников М.А., Молотов П.Е. Вихретоковый измеритель толщины стенки труб при наличии изоляционного покрытия. «Надёжность и качество»: Труды международного симпозиума. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та. – 2004. – С. 76.
8. Санников М.А., Зеленский А.В. Учёт влияния кривизны поверхности и наклона датчика при диагностике газопроводов вихретоковыми приборами. Самар. госуд. аэрокомич. ун-т. – Самара, 2007. – 9 с. – Деп. в ВИНТИ Рос. акад. наук 27.07.2007, № 785-B2007.
9. Санников М.А. Программный комплекс для расчёта остаточного срока службы стальных подземных газопроводов. // Газ России. – М.: Росгазификация. – 2004. – №4. – С. 20-21.
10. Санников М.А. Мобильная информационная система для диагностики газопроводов в полевых условиях. «Надёжность и качество»: Труды международного симпозиума. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та. – 2003. – С. 89.
11. Санников М.А. Программа для расчёта остаточного срока службы труб стальных подземных газопроводов по коррозии. // Газ России. – М.: Росгазификация. – 2004. – №1. – С. 27.
12. Санников М.А. Программа для расчёта остаточного срока службы труб стальных подземных газопроводов по коррозии. Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Интеллектуальные системы

управления и обработки информации»: Тезисы докладов. – Уфа: УГАТУ. – 2003. – С. 23.

13. Санников М.А. Использование мобильных информационных систем на базе платформы PalmOS при диагностике газопроводов в полевых условиях. Вестник СГАУ. Выпуск 8. – Самара: СГАУ. – 2003. – С. 96-99.

Подписано в печать 26.10.2007 г. Формат 60x84 1/16

Печать оперативная. Объём 1 п.л. Тираж 100.

Отпечатано в СГАУ, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34