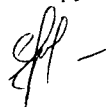


Л 241

На правах рукописи



Лапина Екатерина Андреевна

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ВЫБОРЕ
И ОБОСНОВАНИИ ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ АСУ ТП**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка
информации (промышленность)»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2011

Диссертационная работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет) на кафедре «Информационно-измерительная техника».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Шестаков А.Л.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Казаринов Л.С.,
кандидат технических наук
Медведевских С.В.

Ведущее предприятие – ГОУ ВПО «Уфимский государственный
авиационный технический университет».

Защита состоится 22 декабря 2011 г., в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, зал заседания ученого совета (ауд. 1001 главного корпуса).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направить на имя ученого секретаря по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет.

Тел.: (351) 267-91-23

E-mail: lilia.if@mail.ru

Автореферат разослан 18 ноября 2011 г.

Ученый секретарь специализированного диссертационного совета Д 212.298.03,
доктор технических наук, профессор



Некрасов С.Г.

470915

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Техническая политика в области автоматизации промышленного производства ориентирована на создание современных интегрированных АСУ ТП на базе микропроцессорных устройств и развитой информационно-вычислительной инфраструктуры. Измерительные каналы, входящие в состав АСУ рассматриваются как единые неразрывные структуры получения, обработки и представления информации о значениях физических величин. При этом высокое качество, надежность, долговечность и другие эксплуатационные и технико-экономические показатели системы в значительной мере определяются характеристиками устройств восприятия измерительной информации. Изучение подобных систем и их элементов требует применения методов системного анализа.

Современное промышленное производство связано с измерением широкого спектра физических величин. Одной из наиболее распространенных величин является давление. Для измерения давления большое распространение получили измерительные преобразователи давления на основе тензорезисторов. Однако, данным преобразователям присущи недостатки в виде значительных погрешностей от нелинейности функции преобразования и сильной температурной зависимости.

Благодаря развитию микропроцессорной техники стало возможным перейти от схемотехнических решений к алгоритмическим методам коррекции погрешностей, основанным на применении специальных моделей функций преобразования (ФП) измерительных преобразователей (ИП) давления. Обычно повышение точности таких преобразователей связано с увеличением сложности аппроксимирующих функций и количества реперных точек при их испытании и калибровке. Это приводит к увеличению стоимости датчиков давления за счет увеличения трудовых и временных затрат, а следовательно удорожанию автоматизированных систем и снижению конкурентоспособности на рынке автоматизации промышленного производства (см. например, РД 34.35.126-93. Положение о разработке новых АСУ ТП на конкурсной основе. Утв. РАО «ЕЭС России» 20.12.1993 г.).

В этой связи актуальным является вопрос разработки алгоритмов нахождения наиболее простых моделей ФП для преобразователей давления, используемых в АСУ ТП, и позволяющих увеличить быстродействие системы, а так же сократить затраты на проведения испытаний датчиков без ухудшения их характеристик.

Целью работы является разработка алгоритмов обработки информации, позволяющих выбирать более простые функции преобразования измерительных преобразователей давления с сохранением заданной точности измерения давления.

Задачи работы. Для достижения цели диссертационной работы необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать алгоритмы формирования моделей функций преобразования измерительных преобразователей давления с применением статистических методов.

2. Разработать алгоритмы и способы выбора функций преобразования для *отдельных* экземпляров измерительных преобразователей давления.

3. Разработать алгоритмы получения функции преобразования, *общей* для датчиков давления *определенного конструктивного исполнения*;

4. Провести апробацию созданных алгоритмов и программ путем проверки полученных ФП на экспериментальных данных, для датчиков давления *различного конструктивного исполнения*.

Методы исследования. Выполненные в работе исследования базируются на использовании статистических методов анализа, элементов алгебры логики, методов математического моделирования и экспериментальных исследованиях

Достоверность и обоснованность результатов работы. Математические модели функций преобразования, предложенные в работе, основаны на корректном использовании статистических методов анализа. Достоверность полученных в работе результатов подтверждается имитационным моделированием функций преобразования. Разработанные алгоритмы базируются на статистических критериях для получения статистических выводов с заданным уровнем достоверности и проверены на больших партиях экспериментальных данных.

Научная новизна. Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке и предложении новых алгоритмов и показателей:

1. Разработан алгоритм разбиения партии преобразователей, изготовленных в едином технологическом цикле на непересекающиеся группы, по уникальным признакам точностных характеристик. Это позволяет реализовать разбиение преобразователей на группы, обладающие различными точностными характеристиками.

2. Предложен показатель сложности для оценки частных моделей функции преобразования, основанный на использовании процедуры ранжирования членов модели и придании им различных весов в зависимости от степени влияющего фактора температуры. Это дает возможность формализовать процесс выбора более простых моделей, не ухудшающих точностные характеристики исследуемых преобразователей.

3. Разработаны алгоритмы формирования моделей функций преобразования для *отдельных* экземпляров преобразователей давления на основе различных способов объединения моделей, полученных разными статистическими методами, с использованием операторов алгебры логики. Это обеспечивает большую полноту и объективность охвата всех моделей функций преобразования, полученных с использованием различных статистических критериев.

4. Разработан алгоритм получения *«общей»* модели функции преобразования для датчиков давления *определенного конструктивного исполнения*, путем объединения моделей *отдельных* исследованных экземпляров преобразователей.

Практическая ценность. Практическая ценность полученных результатов диссертационной работы, заключается в следующем:

1. Применение предложенных в работе классификационных признаков для разбиения партии измерительных преобразователей давления на группы, дает возможность выявлять преобразователи, имеющие неудовлетворительные для заданного класса точности характеристики, *на ранних стадиях производства датчиков давления*. Алгоритмизация этих признаков позволяет автоматизировать процесс разбраковки измерительных преобразователей, что снижает издержки производства.

2. Полученные модели функций преобразования имеют более простой вид, чем используемые в настоящее время, и обеспечивают показатели погрешности от нелинейности и температурной погрешности, отвечающие требованиям нормативной документации. Применение в АСУ ТП датчиков давления с такими функциями преобразования повышает быстродействие системы и улучшает ее технико-экономические показатели.

3. Разработанные алгоритмы позволяют создавать на приборостроительном предприятии, выпускающем датчики давления, библиотеку функций преобразования для *каждой* конструкции преобразователя давления, выпускаемой промышленным предприятием. При этом, процедуру нахождения по результатам градуировки функции преобразования отдельных датчиков *определенной конструкции*, предлагается свести к *нахождению индивидуальных коэффициентов модели функции преобразования*, взятой из библиотеки для этой конструкции.

4. Разработанный программный продукт, позволяет получать модели функций преобразования описанными в работе методами, что дает возможность использовать программу для исследований измерительных преобразователей давления разных конструкций.

Реализация результатов работы. Разработанные в работе алгоритмы реализованы и внедрены в рамках выполнения научно-исследовательских работ (НИР № 2005122-13 от 01.09.2007 г., НИР № 2005122-21/1 от 29.08.2008 г., НИР №2005122-27 от 01.12.2009 г., НИР №2005122-31 от 10.11.2010 г.) на ЗАО «Промышленная группа «Метран». Предложенные в работе модели функций преобразования использованы при проведении испытаний преобразователей давления на ЗАО «Промышленная группа «Метран», что подтверждается актом внедрения.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на научно-технических совещаниях в Глобальном инженерном центре ЗАО «ПГ «Метран» в 2007 – 2010 годах.

Результаты работы докладывались на: 9-й Международной научно-технической конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века» – (Воронеж, НПФ «Саквоее», 13–15 мая 2008 г.); Всероссийской научной практической конференции «Разработки Российской Федерации по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники» (Секция «Информационно-телекоммуникационные системы», Челябинск, ЮУрГУ, 11–13 мая 2009 г.); XII и XIII международных научно-практических конференциях «Фун-

даментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики» (г. Сочи, ГОУ ВПО «МГУПИ», 5 – 9 октября 2009 г.; 4 – 8 октября 2010 г.); IX и X Всероссийских научных конференциях молодых ученых «Наука, технологии, инновации (НТИ-2009) и (НТИ-2010)» (Новосибирск, ГОУ ВПО «НГТУ», 4 – 5 декабря 2009 г.; 3 – 5 декабря 2010 г.); Второй международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире 2009» (Санкт-Петербург, ГОУ ВПО «СПбГПУ», 8 – 10 декабря 2009 г.); Девятой международной научно-практической конференции «Исследования, разработки и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, 22 – 23 апреля 2010 г.); научных конференциях ЮУрГУ в 2008–2010 году

Публикации. По результатам диссертационных исследований и разработок опубликовано 13 печатных работ, из них 4 работы в ведущем рецензируемом журнале ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы – 121 наименование и четырех приложений. Основная часть работы содержит 122 с., 22 рис., 56 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы диссертационной работы, ее цель и задачи, научная новизна и практическая ценность исследований.

В первой главе приведены результаты исследования отечественных и зарубежных научных источников, посвященных проблеме выбора и обоснования функций преобразования измерительных преобразователей давления. Обзор литературы показал, что в качестве математической модели ФП интеллектуальных датчиков давления наиболее часто используются двухфакторные модели ФП, входными факторами в которых выступают измеряемое датчиком давление и температура окружающей датчик среды. Анализ научных работ выявил различные точки зрения на пути решения этой проблемы: а) представление функций преобразования измерительного преобразователя в виде системы локальных пространственных элементов (Пьявченко О.Н., Клевцов С.И., Удод Е.В., Мокров Е.А., Панич Е.А. и др.); б) нахождение функций преобразования измерительных преобразователей методом «спора» математических моделей (Свинолупов Ю.Г., Бычков В.В. и др.); в) синтез функций преобразования измерительных преобразователей по заданному пределу приведенной погрешности (Килимник В.А., Данилов Н.А. и др.); г) использование метода «срезов» для формирования функций преобразования измерительных преобразователей (Шестаков А.Л., Лапин А.П. и др.) и ряд других направлений (Попов А.Е., Виноградов А.Л., Голь А.С., Горбунов С.В. и др.). Известны зарубежные исследования (John Charman, 1990; S. Fricke, 2010; G. Coraucci, 2011) проводимые по аналогичной тематике. Количество возможных вариантов ФП на основе многофакторной модели обычно велико. Однако, задача поиска наиболее простой ФП решена не до конца. На основе анализа и обобщения результатов исследований, проведенных в первой главе, сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе исследуются модели функций преобразования измерительных преобразователей давления. Исходная информация для построения функции преобразования получается в результате градуировки измерительного преобразователя. На вход преобразователя подается определенная последовательность значений образцового давления, при фиксированных температурах среды, в которой находится ИП (табл.1).

Таблица 1

План испытаний измерительных преобразователей

Температура окружающей среды, °С	T_1				T_2				T_{K_T+1}					
	P_1	P_2	P_3	...	P_{K_P+1}	P_1	P_2	...	P_{K_P+1}	...	P_1	P_2	...	P_{K_P+1}
Образцовое давление, Па	P_1	P_2	P_3	...	P_{K_P+1}	P_1	P_2	...	P_{K_P+1}	...	P_1	P_2	...	P_{K_P+1}
Напряжение выходное ИП по давлению, U_p	U_{P_1}	U_{P_2}	U_{P_3}	...	U_{K_P+1}	U_{P_1}	U_{P_2}	...	U_{K_P+1}	...	U_{P_1}	U_{P_2}	...	U_{K_P+1}
Напряжение выходное ИП по температуре, U_T	U_{T_1}	U_{T_1}	U_{T_1}	...	U_{T_1}	U_{T_2}	U_{T_2}	...	U_{T_2}	...	U_{K_T+1}	U_{K_T+1}	...	U_{K_T+1}

По результатам градуировки строится модель обратной ФП измерительного преобразователя вида

$$P = F^{-1}(U_p(T) + e_p, T), \quad (1)$$

где P – рассчитанное на основе обратной ФП измеряемое (подаваемое на вход ИП) давление, Па; U_p – напряжение на выходе ИП; T – температура среды, в которой находится ИП, °С; e_p – различного рода неучтенные факторы (помехи); F^{-1} – модель обратной ФП.

Примем следующий вид обратной функции преобразования

$$P = \sum_{N=0}^{K_P} B_N(T) (U_p)^N + e, \quad (2)$$

где P – рассчитанное на основе обратной ФП измеряемое (подаваемое на вход ИП) давление; $B_0(T) \dots B_{K_P}(T)$ – коэффициенты обратной ФП ИП как функции температуры T при U_p ; U_p – напряжение на выходе ИП давления; K_P – показатель степени полинома по давлению; e – различного рода неучтенные факторы (помехи).

В современных микропроцессорных датчиках предусмотрен канал измерения температуры, имеющий на выходе напряжение U_T , пропорционально температуре окружающей среды. Поэтому коэффициенты $B_0(T) \dots B_{K_P}(T)$ могут быть записаны как функции температуры следующим образом

$$B_N(T) = \sum_{j=0}^{K_T(N)} \beta_{N,j} \cdot U_T^j, \quad (3)$$

где $K_T(N)$ – значение степени полиномов (коэффициентов) входящих в выражение (2); U_T – напряжение на выходе ИП давления, пропорциональное темпе-

ратуре окружающей среды (канал измерения температуры); $\beta_{N,0} \dots \beta_{N,K_T(N)}$ – коэффициенты, описывающие полиномиальное представление $B_N(T)$.

Вид функции преобразования (2),(3) определяется параметрами K_p и K_T . Согласно рекомендациям ГОСТ 22520-85 принимаем $K_p = 5$ и $K_T = 5$. С учетом проведенного в первой главе анализа проблемы, в диссертационной работе исследована двухфакторная модель обратной ФП ИП следующего вида

$$\begin{aligned}
 P = & p^0(\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 + \beta_4 t^4 + \beta_5 t^5) + \\
 & + p^1(\beta_6 + \beta_7 t + \beta_8 t^2 + \beta_9 t^3 + \beta_{10} t^4) + \\
 & + p^2(\beta_{11} + \beta_{12} t + \beta_{13} t^2 + \beta_{14} t^3) + \\
 & + p^3(\beta_{15} + \beta_{16} t + \beta_{17} t^2) + \\
 & + p^4(\beta_{18} + \beta_{19} t) + \\
 & + p^5 \beta_{20}
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $\beta_0 \dots \beta_{20}$ – коэффициенты математической модели; p, t – **нормированные** значения напряжений на выходе ИП по давлению и температуре

$$p = \frac{U_p - U_{p_{\min}}}{U_{p_{\max}} - U_{p_{\min}}} \quad \text{и} \quad t = \frac{U_T - U_{T_{\min}}}{U_{T_{\max}} - U_{T_{\min}}} \quad \text{соответственно.}$$

Для модели такого вида (4) множество частных моделей, отличающихся друг от друга различным набором коэффициентов, может быть определено как $2^{21} = 2\,097\,152$. Частные модели обладают различными значениями характеристик по точности: погрешности от нелинейности, температурной погрешности и других.

Основываясь на заявленной в работе цели исследования, полагаем, что чем больше коэффициентов содержит математическая модель, тем она сложнее. Наиболее простой является модель, содержащая только коэффициент β_0 , а наиболее сложной является модель, содержащая все 21 коэффициент для модели (4). Но количество коэффициентов не может выступать в качестве единственного показателя сложности модели ФП.

Изучена возможность применения для оценки сложности моделей ФП известного (Данилов Н.А., 2007) показателя сложности. Показана его ограниченность при использовании модели вида (4). Предложен новый показатель сложности, основанный на использовании процедуры ранжирования членов модели и придании им различных весов в зависимости от степени влияющего фактора температуры. Наиболее весомыми будем считать члены математической модели, имеющие наибольший показатель степени температуры (табл. 2).

С учетом такого ранжирования членов модели сформируем показатель для оценки сложности моделей в виде числа «С», определяемого выражением (5), как сумма весов членов модели

$$C = I(L \cdot z), \tag{5}$$

где $I = [2^{20} 2^{19} \dots 2^0]$ – вектор-строка размером (1×21) , позволяет сделать переход от двоичного к десятичному представлению числа «С»; L – матрица (табл. 3) размером (21×21) , предназначена для перехода от модели ФП к двоичному числу (двоичному представлению показателя сложности этой модели) с количеством разрядов равным 21. Первый (младший) разряд этого числа равен еди-

нице, если в модели присутствует член β_0 , иначе он равен нулю; второй разряд числа равен единице, если в модели присутствует член $\beta_6 p$, иначе он равен нулю и т.д. для всех входящих в модель членов в соответствие с таблицей 2;

z – вектор-столбец размером (21×1) . В качестве элементов вектора z выступают единицы и нули, соотношенные с коэффициентами оцениваемой модели (единица – когда соответствующий коэффициент присутствует в модели, ноль – когда коэффициент отсутствует)

$$\beta_0 \leftrightarrow z(1), \beta_1 \leftrightarrow z(2), \beta_2 \leftrightarrow z(3), \dots, \beta_{20} \leftrightarrow z(21). \quad (6)$$

Таблица 2

Ранжирование членов модели ФП вида (4)

Группы членов модели	Члены модели	Ранг членов модели	Вес членов модели
Члены модели, содержащие параметр: t	$\beta_5 t^5$	1	2^{20}
	$\beta_4 t^4$	2	2^{19}
Члены модели, содержащие параметры: t и p	$\beta_{10} t^4 p$	3	2^{18}
Члены модели, содержащие параметр: t	$\beta_3 t^3$	4	2^{17}
Члены модели, содержащие параметры: t и p	$\beta_9 t^3 p$	5	2^{16}
	$\beta_{14} t^3 p^2$	6	2^{15}
Члены модели, содержащие параметр: p	$\beta_{20} p^5$	7	2^{14}
	$\beta_{18} p^4$	8	2^{13}
Члены модели, содержащие параметры: t и p	$\beta_{19} p^4 t$	9	2^{12}
Члены модели, содержащие параметр: p	$\beta_{15} p^3$	10	2^{11}
Члены модели, содержащие параметры: t и p	$\beta_{16} p^3 t$	11	2^{10}
	$\beta_{17} p^3 t^2$	12	2^9
Члены модели, содержащие параметр: t	$\beta_2 t^2$	13	2^8
Члены модели, содержащие параметры: t и p	$\beta_{13} t^2 p$	14	2^7
	$\beta_{13} t^2 p^2$	15	2^6
Члены модели, содержащие параметр: t	$\beta_1 t$	16	2^5
Члены модели, содержащие параметры: t и p	$\beta_7 t p$	17	2^4
	$\beta_{12} t p^2$	18	2^3
Члены модели, содержащие параметр: p	$\beta_{11} p^2$	19	2^2
	$\beta_6 p$	20	2^1
Постоянная составляющая модели	β_0	21	2^0

Таким образом, используя для оценки сложности математической модели ФП два показателя, а именно, количество коэффициентов в модели и показатель сложности в виде числа «С», можно решить задачу выбора наиболее простой модели ФП из некоторой совокупности моделей, удовлетворяющих требованиям по точности. При этом сохраняются точностные характеристики ИП и возможен более простой план испытания преобразователей.

В работе приведен пример оценки сложности девяти моделей ФП, имеющих одинаковое количество членов модели.

Матрица L, размером (21x21)

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}	β_{11}	β_{12}	β_{13}	β_{14}	β_{15}	β_{16}	β_{17}	β_{18}	β_{19}	β_{20}
β_5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
β_4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
β_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
β_3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
β_9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
β_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
β_{20}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
β_{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
β_{19}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
β_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
β_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
β_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
β_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
β_2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
β_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
β_1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
β_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
β_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
β_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
β_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
β_0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

В работе показано, что оценку вектора коэффициентов β исходной модели (4) по экспериментальным данным целесообразно проводить по методу наименьших квадратов согласно выражению

$$B = (X' \cdot X)^{-1} \cdot X' \cdot P, \quad (7)$$

где B — вектор оценок коэффициентов модели β , размер (21×1) ; P — вектор давлений на входе ИП (табл. 1), размер $(n \times 1)$; X — матрица независимых переменных, размер $(n \times 21)$; X' — транспонированная матрица независимых переменных; $(X'X)^{-1}$ — обратная матрица; $n = (K_p + 1) \cdot (K_T + 1)$ — количество точек градуировки.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & \dots & p_1 & p_1 \cdot t_1 & \dots & p_1^5 \\ 1 & t_2 & t_2^2 & \dots & p_2 & p_2 \cdot t_2 & \dots & p_2^5 \\ 1 & t_3 & t_3^2 & \dots & p_3 & p_3 \cdot t_3 & \dots & p_3^5 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \dots \\ 1 & t_n & t_n^2 & \dots & p_n & p_n \cdot t_n & \dots & p_n^5 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_{20} \end{bmatrix}$$

В соответствии с поставленной в работе задачей выбора моделей ФП, необходимо сформировать и исследовать множество M частных моделей, полученных на основе выражения (4). Используем для этого введенный нами ранее в обращении вектор z размером (21×1) вида (6), элементами которого выступают

только два числа, «1» или «0». Элементы этого вектора соотносятся с коэффициентами исходной математической модели (4) следующим образом

$$\beta_0 \leftrightarrow z(1), \beta_1 \leftrightarrow z(2), \beta_2 \leftrightarrow z(3), \dots, \beta_{20} \leftrightarrow z(21).$$

Например, частной математической модели вида $P = \beta_0 + \beta_1 \cdot t + \beta_6 \cdot p$ будет соответствовать вектор $z' = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, а исходной модели (4), включающей все коэффициенты, будет соответствовать вектор, имеющий все единичные элементы, т.е. $z' = [1 \ 1]$.

Сформируем матрицу Z размером (21×21) , диагональные элементы которой будут соответствовать элементам вектора z , а именно

$$z(i, i) = z(i), \quad i = 1, 2, 3 \dots 21. \quad (8)$$

Преобразуем матрицу X в матрицу X_M путем умножения ее на матрицу Z

$$X_M = X \cdot Z. \quad (9)$$

Результатом такого умножения является матрица X_M того же размера $(n \times 21)$, что и исходная матрица X , но элементы этой матрицы соответствуют рассматриваемой частной модели. Вектор оценок коэффициентов такой модели примет вид

$$B_M = (X_M' \cdot X_M)^{-1} \cdot X_M' \cdot P. \quad (10)$$

Последовательно осуществляя формирование вектора z одним из статистических методов и, в соответствии с этим меняя диагональные элементы матрицы Z , мы можем построить множество M частных математических моделей ФП в рамках выражения (4).

В работе рассмотрены четыре статистических метода (Дрейпер, 1987) построения частных моделей ФП: метод всех возможных регрессий, метод включения переменных, метод исключения переменных, шаговый метод построения модели. Методы отличаются алгоритмами формирования моделей ФП и используемыми статистическими критериями. Они дают, в общем случае, различные модели для одинаковых экспериментальных данных.

Рассмотрим алгоритм построения модели на примере метода всех возможных регрессий. Метод состоит в последовательном построении и анализе всех возможных моделей функции преобразования вида (4). Общее количество частных моделей выражения (4) равно $M = 2^{20} = 1\,048\,576$ уравнений (моделей), поскольку предполагаем, что член β_0 всегда содержится в модели.

Разделив все множество M моделей выражения (4), получим 21 подмножество, каждое из которых содержит d переменных ($d = 0, 1, 2, \dots, 20$), помимю переменной β_0 , а именно – $M = M_0 + M_1 + M_2 + \dots + M_{19} + M_{20}$. Для определения числа уравнений в каждом подмножестве воспользуемся формулой для числа сочетаний из m элементов по d :

$$N = C_m^d = \frac{m!}{d!(m-d)!} = \frac{m(m-1)\dots(m-d+1)}{d!}, \quad (11)$$

где m – общее количество переменных ($m=20$) входящих в модель; d – число переменных входящих в исследуемую модель (за исключением β_0).

Каждое новое подмножество формируется путем увеличения числа переменных в модели ФП. Представление множества M всех возможных частных моделей на основе (4), с разбиением на подмножества, использовано для разработки алгоритма формирования вектора z методом всех возможных регрессий.

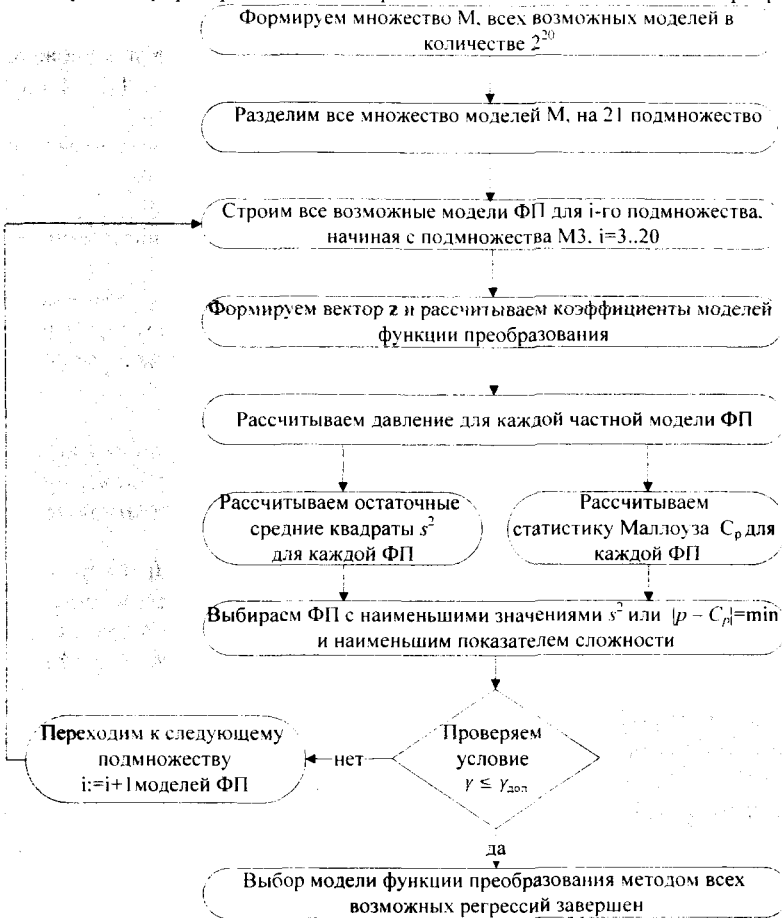


Рис. 1. Алгоритм поиска модели функции преобразования методом **всех возможных регрессий**

Поиск модели начинаем с подмножества M_3 (наиболее простые модели, включающие оба входных фактора) и продолжаем последовательно в подмножествах M_4 , M_5 и т.д.

Для каждого подмножества, с использованием выражения (8), формируется набор векторов z . Количество векторов z для конкретного подмножества определяется согласно выражению (11). Для каждой модели ФП из подмноже-

ства, на основе соответствующего ей вектора z , определяются ее коэффициенты (10). Рассчитывается показатель сложности такой модели и величины остаточного среднего квадрата или статистики Маллоуза. Поиск внутри подмножества прекращается при нахождении модели, имеющей наименьшие значения величины остаточного квадрата или статистики Маллоуза и показателя сложности (5), и удовлетворяющей требованиям по величине приведенной погрешности для исследуемого класса точности преобразователя. Такая модель расценивается как наилучшая модель ФП, найденная методом всех возможных регрессий внутри одного подмножества, и представляется в виде вектора z .

В случае, если в рамках одного подмножества (например, М3) не удастся достичь выполнения этих условий ни для одной из моделей, входящих в данное подмножество, то следует перейти к следующему по порядку подмножеству (в данном случае к М4) и осуществить выполнение аналогичных действий.

Далее во второй главе приведено описание трех других статистических методов (метод включения переменных, метод исключения переменных, шаговый метод) построения математических моделей, адаптированных под решение задачи диссертации, и разработанные на их основе алгоритмы.

Результатом второй главы явилась разработка алгоритмов формирования частных моделей функций преобразования измерительных преобразователей давления с применением четырех статистических методов. Под частными моделями ФП в работе понималось множество всех возможных моделей, реализуемых в рамках выражения (4).

Третья глава посвящена разработке алгоритмов выбора моделей функций преобразования измерительных преобразователей. *Первый* разработанный в главе алгоритм направлен на разбиение партии измерительных преобразователей, изготовленных в одном технологическом цикле, на непересекающиеся группы преобразователей. Разбиение осуществляется на основе уникальных признаков точностных характеристик: величины максимальной погрешности от нелинейности ИП; разброса погрешности от нелинейности ИП по двум соседним температурам при постоянном давлении; величины температурной погрешности при градуировке и верификации преобразователей. На основе исследованных автором больших партий ИП давления, были получены (на примере преобразователей класса 0,1) ограничения по величине каждого признака. Это позволило сформировать три непересекающиеся группы измерительных преобразователей: с наилучшими (группа А – рис.2), хорошими (группа В) и неудовлетворительными для данного класса точности (группа С) характеристиками.

Разработанный алгоритм разбиения на группы был апробирован на 8-ми экспериментальных партиях ИП двух различных конструкций. Сравнение данных разбиения преобразователей на группы, с результатами градуировки и верификации датчиков давления, собранных на основе исследованных партий ИП, показало хорошую согласованность результатов. Это дает возможность выбирать из группы «А» измерительные преобразователи с наилучшими пока-

зателями, на основе которых и должно быть проведено исследование моделей ФП статистическими методами, изложенными в главе 2.

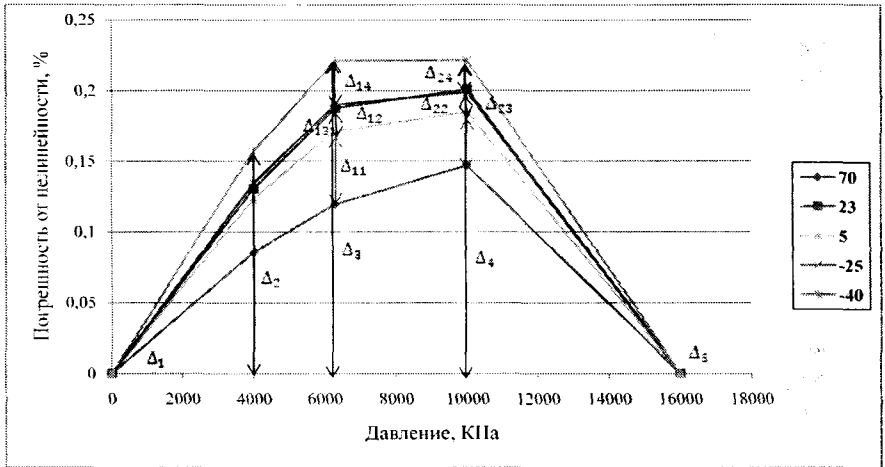


Рис. 2. График погрешности от нелинейности измерительного преобразователя, относящегося к группе А, при различных температурах

Далее в третьей главе рассмотрены способы формирования моделей функций преобразования. Это связано с тем, что используемые в работе статистические методы базируются на различных статистических критериях и дают различные модели ФП для одинаковых экспериментальных данных. Предлагаются пять различных способов формирования «индивидуальных» ФП для исследуемых ИП на основе моделей, полученных четырьмя статистическими методами. Предложенные в работе способы описаны для случая использования трех преобразователей и представления моделей в виде векторов, найденных ранее рассмотренными статистическими методами, а именно: вектора Za , полученного методом всех возможных регрессий; вектора Zb , полученного методом исключения коэффициентов; вектора Zc , полученного методом включения коэффициентов; вектора Zd , полученного шаговым методом.

На основе пяти «индивидуальных» моделей ФП исследуемых ИП предлагается сформировать «промежуточные» ФП измерительного преобразователя исследуемой конструкции. Полученные таким образом пять «промежуточных» функций преобразования ИП подлежат проверке, результатом которой является окончательный выбор одной из рассматриваемых «промежуточных» моделей ФП и принятии ее за «общую» функцию преобразованию исследуемого измерительного преобразователя определенного конструктивного исполнения.

Предложенные в работе способы созданы на основе сочетания различных комбинаций моделей ФП с использованием операторов алгебры логики. **Первый** способ формирования моделей состоит в следующем:

1. На основе четырех полученных векторов (метод всех возможных регрессий – вектор Za , метод исключения – вектор Zb , метод включения – вектор Zc и шаговый метод – вектор Zd) необходимо сформировать *один* вектор для ФП каждого из *трех* исследуемых ИП. Оставим в нем только те элементы, которые входят *хотя бы в три* вектора из четырех (Za, Zb, Zc, Zd) возможных. Таким образом, мы формируем векторы Ze (для первого преобразователя), Zf (для второго преобразователя), Zg (для третьего преобразователя), которые используются для определения вида «индивидуальной» ФП каждого из исследуемых преобразователей. Это условие можно записать с использованием операторов алгебры логики следующим образом:

$$\begin{aligned} & \{ [Za(i) \& Zb(i) \& Zc(i) \& Zd(i)] \cup [Za(i) \& Zb(i) \& Zc(i)] \cup [Za(i) \& Zb(i) \& Zd(i)] \cup \\ & [Za(i) \& Zc(i) \& Zd(i)] \cup [Zb(i) \& Zc(i) \& Zd(i)] = 1; \\ & \Rightarrow [Ze(i) \& Zf(i) \& Zg(i)] = 1 \\ & \{ [Za(i) \& Zb(i) \& Zc(i) \& Zd(i)] \cup [Za(i) \& Zb(i) \& Zc(i)] \cup [Za(i) \& Zb(i) \& Zd(i)] \cup \\ & [Za(i) \& Zc(i) \& Zd(i)] \cup [Zb(i) \& Zc(i) \& Zd(i)] \neq 1; \\ & \Rightarrow [Ze(i) \& Zf(i) \& Zg(i)] = 0 \end{aligned}$$

где $i=1,2,3,\dots,2l$; $\&$, \cup , \Rightarrow – символы конъюнкции («И»), дизъюнкции («ИЛИ») и импликации («ЕСЛИ...ТО») соответственно.

2. Имея «индивидуальные» функции преобразования для каждого из трех исследуемых измерительных преобразователей (векторы Ze, Zf, Zg соответственно), находим «промежуточную» функцию преобразования (вектор Zh), содержащую коэффициенты, которые входят *хотя бы в одну* «индивидуальную» функцию преобразования. Это условие можно записать с использованием операций алгебры логики следующим образом:

$$\begin{aligned} & \{ [Ze(i) \& Zf(i) \& Zg(i)] \cup [Ze(i) \& Zf(i)] \cup [Zf(i) \& Zg(i)] \cup [Ze(i) \cup \\ & Zf(i) \cup Zg(i) = 1] \Rightarrow Zh(i) = 1 \\ & \{ [Ze(i) \& Zf(i) \& Zg(i)] \cup [Ze(i) \& Zf(i)] \cup [Zf(i) \& Zg(i)] \cup [Ze(i) \cup \\ & Zf(i) \cup Zg(i) \neq 1] \Rightarrow Zh(i) = 0 \end{aligned}$$

где $i=1,2,3,\dots,2l$; $\&$, \cup , \Rightarrow – символы конъюнкции («И»), дизъюнкции («ИЛИ») и импликации («ЕСЛИ...ТО») соответственно. Вектор Zh определяет вид «промежуточной» функции преобразования, полученной способом № 1, и являющейся общей для трех исследуемых ИП.

3. На основе полученной «промежуточной» модели функции преобразования (вектор Zh), необходимо рассчитать коэффициенты ФП для каждого из исследуемых преобразователей и проверить модель на соответствие требованиям нормативной документации для соответствующего класса точности.

Далее в третьей главе описан полный алгоритм получения общей функции преобразования для ИП определенной конструкции. Алгоритм реализован в виде последовательно выполняемых этапов и представлен на рис. 3.

Результатом написания третьей главы явились: алгоритмы и способы выбора функций преобразования для *отдельных* экземпляров измерительных преобразователей давления, полученных на основе четырех статистических методов, и объединения их в одну модель; алгоритмы получения функции преобразования, *общей* для датчиков давления (ДД) определенного конструктивного исполнения, на основе ФП отдельных преобразователей.

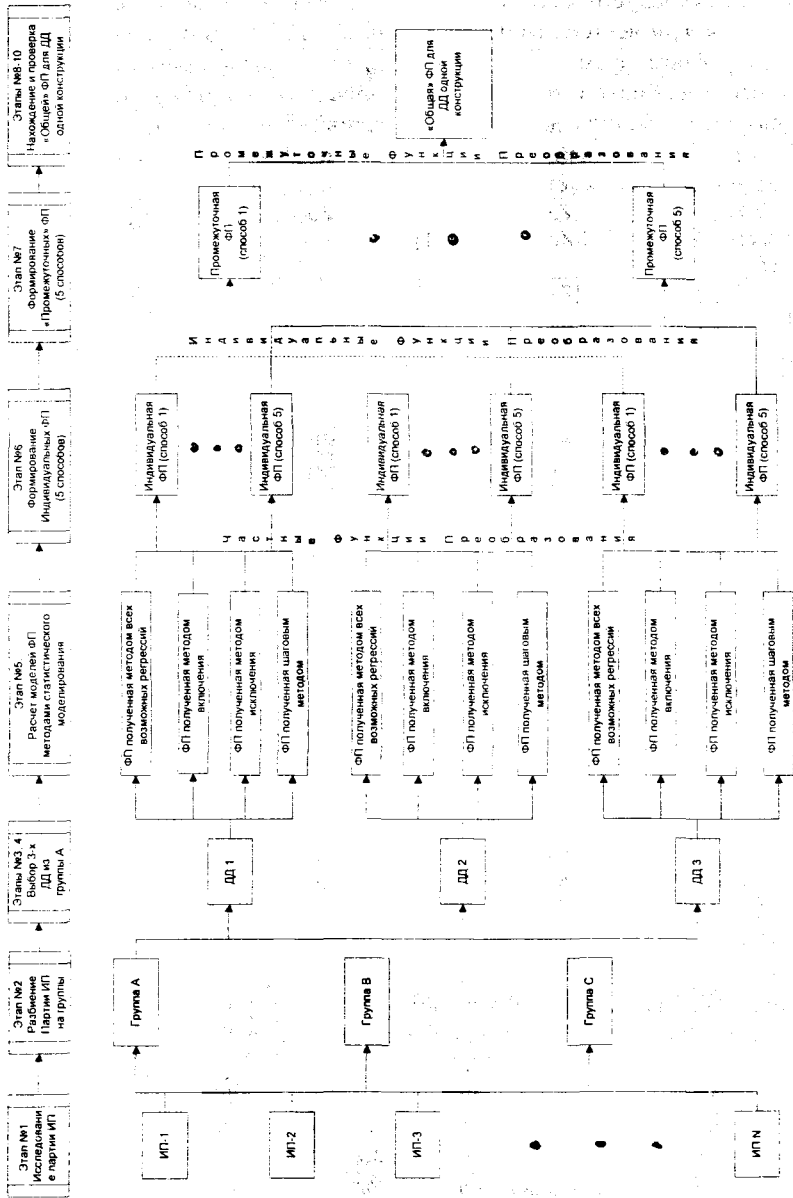


Рис. 3. Схема алгоритма получения общей функции преобразования

В четвертой главе дается описание разработанной программы моделирования, предназначенной для построения частных математических моделей ФП исследуемых преобразователей на основе модели вида (4), изложенными в главе 2 статистическими методами.

С использованием этой программы проведена проверка предложенных в главе 3 алгоритмов выбора моделей ФП датчиков давления. Расчеты функций преобразования выполнены по четырем статистическим методам (глава 2), на примере трех датчиков давления одного конструктивного исполнения серии Метран-100 (класс точности – 0,1). Найдена функция преобразования, общая для датчиков давления исследованной конструкции, содержащая 14 коэффициентов математической модели, вместо 21 коэффициента модели вида (4). Точность найденной модели ФП, имеющей более простую структуру, сопоставима с точностью полной модели. Все рассчитанные значения погрешностей по данным градуировки и верификации, соответствуют требованиям нормативной документации для исследованного класса точности.

Аналогичным образом проведены исследования и осуществлен выбор функции преобразования еще для трех различных конструкций датчиков давления серии Метран-100. На этих примерах показана принципиальная возможность выбора ФП датчиков давления более простого вида, при сохранении их точностных характеристик.

Предложенные в работе алгоритмы были использованы так же при исследовании измерительных преобразователей датчиков давления серии Метран-150TG (мод. TG1 – TG5) и Метран-150CD (мод. CD0 – CD5). В результате этих исследований, для различных конструкций датчиков давления серии Метран-150TG (мод. TG1 – TG5) и Метран-150CD (мод. CD0 – CD5), впервые были получены математические модели функций преобразования: обеспечивающие заданный класс точности измерительных преобразователей; обладающие необходимым запасом по приведенной погрешности; содержащие параметр температуры во второй и третьей степени соответственно.

При использовании найденных моделей функции преобразования можно реализовать более простой план проведения испытаний измерительных преобразователей: осуществлять градуировку датчиков Метран-150TG используя *три* (в настоящее время – четыре) температурные точки, а датчиков Метран-150CD – *четыре* (в настоящее время – пять) температурные точки, что подтверждается актом внедрения результатов научно-исследовательской работы на ЗАО «Промышленная группа «Метран».

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

В приложении приведены таблицы расчетов моделей ФП и акты внедрения результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В диссертационной работе предложены и исследованы алгоритмы обработки информации при выборе и обосновании функции преобразования измерительных преобразователей давления. На основе теоретических материалов, методов

статистического анализа и экспериментальных исследований, можно сформулировать следующие **выводы и результаты**:

1. Предложены алгоритмы построения моделей функций преобразования измерительных преобразователей с использованием четырех статистических методов: метода всех возможных регрессий, метода исключения коэффициентов модели, метода включения коэффициентов, шагового метода построения модели. Такой подход дает возможность получить частные модели функций преобразования, отбираемые по разным статистическим критериям, что повышает объективность выбора функции преобразования.

2. Показатель сложности, предложенный автором в работе, позволяет оценивать сложность всех частных моделей функций преобразования, получаемых в рамках исходных моделей функции преобразования. С помощью этого показателя можно выбирать модели с более простым и экономичным планом градуировки по температуре, не ухудшающие точностные характеристики исследуемых преобразователей.

3. Предложен алгоритм разбиения партии измерительных преобразователей давления на непересекающиеся группы по их точностным характеристикам. Алгоритм позволяет сформировать группу преобразователей с наилучшими точностными характеристиками внутри партии. На основе преобразователей из этой группы проводятся исследования частных моделей функций преобразования.

4. Разработан алгоритм получения «общей» модели функции преобразования для датчиков давления *определенного конструктивного исполнения*.

На основе частных моделей функций преобразования, формируются пятью способами (с использованием операций алгебры логики), пять «индивидуальных» функций, для каждого исследуемого датчика. Затем, с использованием операций алгебры логики и пяти способов объединения «индивидуальных» моделей функций преобразования, формируются для всех исследуемых датчиков пять «промежуточных» функций. На заключительном этапе, путем проверки точностных характеристик датчиков на соответствие требованиям нормативной документации, из пяти «промежуточных» моделей, выбирается одна функция преобразования, «общая» для всех датчиков *определенного конструктивного исполнения*.

На основе предложенных алгоритмов разработано программное обеспечение, позволившее по результатам градуировки определять частные модели ФГ; для датчиков давления *различных конструкций*.

5. Формирование и проверка «промежуточных» функций преобразования на соответствие требованиям нормативной документации на точках градуировки и верификации на различных диапазонах измерения, на примере преобразователя конструкции серии Метран-100, позволила выделить общую модель функции преобразования, содержащую всего 14 коэффициентов, вместо 21 коэффициента в исходной модели. Точность найденной модели, имеющей значительно более простую структуру, не хуже точности исходной модели, удовлетворяющая всем требованиям.

6. Алгоритмы обработки информации, предложенные в работе, позволили получить модели функций преобразования измерительных преобразователей давления *различного конструктивного исполнения* датчиков типа «Метран-100» и «Метран-150». Полученные модели были внедрены в производство.

В результате применения предложенных в работе алгоритмов при исследованиях различных конструкций датчиков давления типа Метран-150TG (мод. TG1- TG5) и Метран-150CD (мод. CD0- CD5) *впервые* получены математические модели функций преобразования: обеспечивающие заданный класс точности датчиков; обладающие необходимым запасом по приведенной погрешности; содержащие параметр температуры во второй и третьей степени соответственно. Предложенные модели позволяют проводить испытания датчиков с использованием меньшего числа точек по температуре. Это дает основание считать вышеуказанные датчики весьма перспективными для использования в АСУ ТП.

Теоретические исследования, результаты применения статистических методов анализа и экспериментальные данные доказывают, что заявленная в диссертационной работе цель создания алгоритмов обработки информации для выбора более простых функций преобразования измерительных преобразователей давления с сохранением заданной точности измерения давления, достигнута.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные публикации по теме диссертации в ведущем рецензируемом журнале ВАК

1. Лапин, А.П. Статистическое моделирование функций преобразования датчиков давления типа «Метран» / А.П. Лапин, Ю.Н. Цыпина, **Е.А. Лапина** // Вестник Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ). Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2008. – Вып. 7. – № 3(103). – С. 34–37.
2. Шестаков, А.Л. Задача оптимизации функций преобразования измерительных преобразователей давления / А.Л.Шестаков, А.П. Лапин, **Е.А. Лапина** // Вестник Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ). Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2010. – Вып. 11. – №2 (178). – С. 4–6.
3. Шестаков, А.Л. Алгоритмы выбора и обоснования моделей функций преобразования измерительных преобразователей давления / А.Л.Шестаков, А.П. Лапин, **Е.А. Лапина** // Вестник Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ). Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2010. – Вып. 11. – №2 (178). – С. 7–10.
4. Шестаков, А.Л. Оценка сложности моделей функции преобразования датчика давления / А.Л.Шестаков, А.П. Лапин, **Е.А. Лапина** // Вестник Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ). Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2011. – Вып. 13. – № 2(219). – С. 4–8.

Другие публикации

5. Лапин, А.П. Обоснование вида и исследование функции преобразования датчиков давления типа «Метран / А.П. Лапин, **Е.А. Лапина** // Кибернетика и высокие технологии XXI века: сб. докл. 9-й междуна. научн.-техн. конф. (13 – 15.05.2008 г.) – Воронеж: Изд-во НПФ «Саквое», – С. 1120–1123.

6. Лапина, Е.А. Алгоритмические методы повышения точности измерительных преобразователей давления / Е.А. Лапина // Системы управления и информационные технологии: темат. сб. науч. тр. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2009. – С. 94–97.

7. Лапина, Е.А. Классификация измерительных преобразователей датчиков давления и выбор наилучшей модели функции преобразования / Е.А. Лапина // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики: науч. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф. (05 – 09.10.2009 г.) – М.: Изд-во МГУПИ, 2009. – С. 168–172.

8. Лапина, Е.А. Алгоритмы обработки информации при выборе математических моделей функций преобразования измерительных преобразователей давления / Е.А.Лапина // Наука, технологии, инновации (НТИ-2009): матер. Всеросс. науч. студен. конф. молодых ученых (04 – 05.12.2009 г.) в семи частях. Часть 1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 31–33.

9. Лапина, Е.А. Алгоритмы выбора функций преобразования для промышленных датчиков давления / Е.А. Лапина // Измерения в современном мире 2009: сб. науч. тр. Второй междунар. науч.-практ. конф. (08 – 10.12.2009 г.) - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 31–32.

10. Лапина, Е.А. Компьютерное моделирование функций преобразования измерительных преобразователей давления / Е.А. Лапина // Высокие технологии, исследования, промышленность: сб. тр. 9-й междунар. науч.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (22 – 23.04.2010 г.), том 3. / под ред. А.П.Кудинова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 78–79.

11. Классификация измерительных преобразователей давления методами нечеткого логического вывода / А.П.Лапин, С.С. Суходоева, А.И. Стрехнин. **Е.А. Лапина** // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики: науч. тр. XIII Междунар. науч.- практ. конф. (04 – 08.10.2010 г.) – М.: Изд-во МГУПИ, 2010. – С. 97–102.

12. Лапина, Е.А. Программа статистического моделирования функций преобразования измерительных преобразователей давления / Е.А. Лапина, Е.Г Шильников // Научный поиск: материалы Второй научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т.2. – С. 35–39.

13. Лапина, Е.А. Показатель сложности моделей функции преобразования измерительных преобразователей давления / Е.А. Лапина // Наука, технологии, инновации: матер. X юбил. Всеросс. науч. студ. конф. молодых ученых (03 – 05.12.2010 г.), часть 1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – С. 31–33.