

1758

Контрольный
экземпляр

На правах рукописи



Попов Андрей Евгеньевич

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ 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

8.16
Диссертационная работа выполнена на кафедре информационно-измерительной техники Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Шестаков Александр Леонидович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Казаринов Лев Сергеевич;
кандидат технических наук
Ермишин Сергей Михайлович.

Ведущая организация – Уфимский государственный авиационный
технический университет.

Защита состоится 20 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, ауд. 1001.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Некрасов С.Г.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Эффективность и информативность автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) напрямую зависят от качества и надежности информации, поступающей с измерительных преобразователей. Измерительные преобразователи различных величин зачастую рассматриваются как ключевой элемент АСУ ТП, определяющий работоспособность системы в целом.

Технологии и безопасность производства накладывают особые требования на измерения в технологических процессах, где рабочие среды находятся под давлением. Например, ввиду особенностей технологического процесса, протекающего в первом контуре реакторов АЭС, требуется поддержание постоянного давления и объема теплоносителя. Для выполнения указанной задачи в первом контуре реактора устанавливается компенсатор объема, представляющий собой вертикальный цилиндрический сосуд. Схема автоматического регулирования давления и уровня в компенсаторе объема представлена на рис. 1.

Измерение давления с высокой точностью в рассматриваемой системе является важным, поскольку снижение уровня воды в компенсаторе объема может привести к оголению и перегосу трубчатых электронагревателей, а увеличение уровня приводит к уменьшению парового объема и снижению компенсирующей способности системы по давлению, что может привести к нарушению безопасности технологического процесса.

Высокоточные измерительные преобразователи давления необходимы для построения систем автоматизации, в которых на основе измерения давления рассчитываются такие параметры технологического процесса как масса, плотность, объем и уровень. Например, в АСУ ТП нанесения покрытий в вакууме для нужд радиопромышленности и микроэлектроники чрезвычайно востребованы измерительные преобразователи с погрешностью измерения давления не более 0,02% от диапазона. Повышение точности измерения давления позволит повысить качество автоматизированного контроля процесса осаждения покрытий в вакууме за счет более эффективного контроля толщины получаемых покрытий.

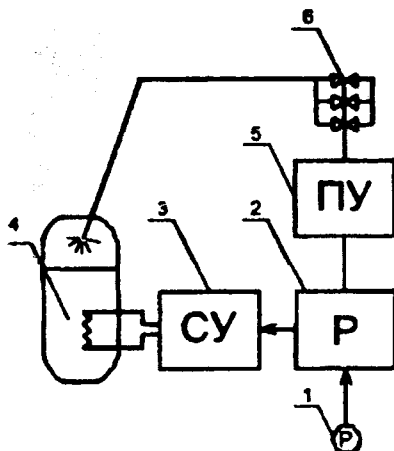


Рис. 1. Схема автоматического регулирования компенсатора объема: 1 – измерительный преобразователь давления; 2 – регулятор (логическое устройство); 3 – силовые устройства; 4 – электронагреватели; 5 – пусковые устройства; 6 – клапаны впрыска воды

Пример системы, в которой на базе измерительных преобразователей давления производится гидростатическое измерение массы в резервуарах, представлен на рис. 2. Прецизионное измерение давления с применением высокоточных измерительных преобразователей позволит сократить убытки при исчислении сырья в нефтегазовой промышленности, поскольку зачастую хранение нефтепродуктов осуществляется с применением подобных систем гидрометрирования резервуаров.

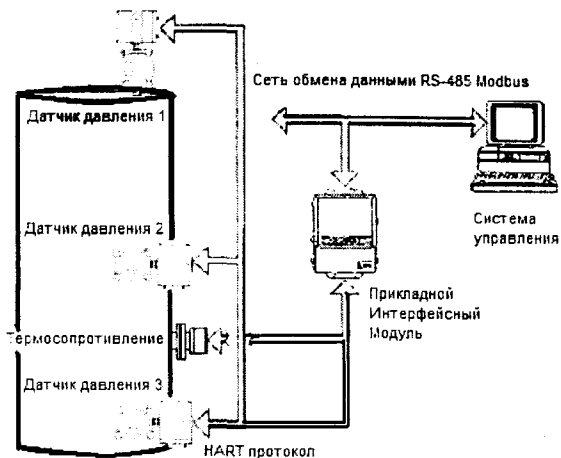


Рис. 2. АСУ ТП гидрометрирования резервуаров

Современные измерительные преобразователи давления, используемые в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами часто характеризуются недостаточной точностью, которая существенно зависит от нелинейности выходного сигнала первичного чувствительного элемента, а также от воздействия неинформативных величин (температуры окружающей среды и изменения углового положения относительно нормали к земной поверхности).

Повышение точности измерительных преобразователей давления путем применения более совершенных чувствительных элементов, обладающих лучшими характеристиками, требует значительных материальных затрат. В этой связи более привлекательным является повышение точности измерительных преобразователей путем аппроксимации их выходных характеристик с применением специальных алгоритмов обработки информации. Для этого необходимо зафиксировать показания измерительного преобразователя при различных входных воздействиях информативных величин (например, с применением пневматических датчиков давления серии «Воздух» и климатических камер), после чего применить алгоритмы обработки информации, позволяющие компенсировать влияние нелинейности выходной характеристики, а также устранить влияние неинформативных величин на показания измерительного преобразователя давления.

Целью диссертационной работы является совершенствование алгоритмического обеспечения процедуры аппроксимации выходных характеристик измерительных преобразователей давления для повышения точности измерительных каналов АСУ ТП. Повышение точности измерительных преобразователей должно производиться только за счет обработки полученной в ходе аппроксимации экспериментальной измерительной информации.

В соответствии с целью исследования поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать специализированные алгоритмы обработки информации при аппроксимации выходных характеристик измерительных преобразователей давления на основе оптимизации по среднеквадратичному критерию, позволяющие повысить точность измерительных каналов АСУ ТП.

2. Разработать алгоритм обработки информации для определения коэффициентов полиномиальных моделей измерительных преобразователей давления на основе оптимизации по равномерному критерию и программно реализовать соответствующий алгоритм.

3. Провести экспериментальное исследование предложенных алгоритмов аппроксимации выходных характеристик измерительных преобразователей давления.

Взаимосвязь представленных задач показана на рис. 3.

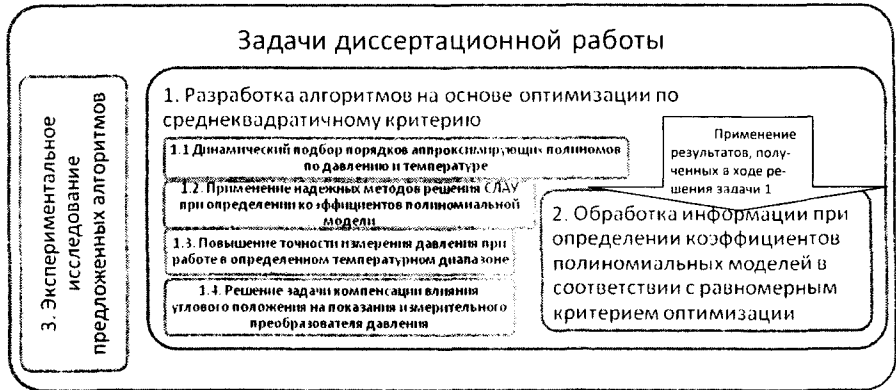


Рис. 3. Задачи диссертационной работы

Методы исследования:

Для решения поставленных задач использованы статистические методы обработки информации, численные методы решения систем уравнений, теория интервальных вычислений, а также методы регрессионного анализа.

Научная новизна:

1. Разработаны специализированные алгоритмы обработки информации, позволяющие повысить точность при определении коэффициентов полиномиальных моделей измерительных преобразователей давления на основе оптимизации по среднеквадратичному критерию. Предложенные алгоритмы отличаются возможностью динамического подбора порядков аппроксимирующих полиномов на этапе расчета, а также повышением точности измерения давления в определенном температурном диапазоне.

2. Разработан итерационный алгоритм аппроксимации выходных характеристик измерительных преобразователей давления с оптимизацией по равно-

мерному критерию, при помощи которого решается задача минимизации приведенной погрешности измерительного преобразователя во всем диапазоне измерений.

3. Предложен метод и реализован алгоритм компенсации влияния изменения углового положения относительно нормали к земной поверхности на показания измерительного преобразователя давления, в основе которого лежит обработка данных, получаемых с установленного на измерительном преобразователе акселерометра.

Практическая ценность:

1. Разработанное в ходе исследования алгоритмическое обеспечение для определения коэффициентов полиномиальных моделей позволяет уменьшить приведенную погрешность измерительных преобразователей давления, применяемых в АСУ ТП.

2. Разработанное на основе алгоритмов программное обеспечение применяется при производстве высокоточных измерительных преобразователей давления в ЗАО «ПГ «Метран»

Апробация работы. Работа была поддержана двумя грантами ЗАО «ПГ «Метран» для студентов, аспирантов, молодых ученых в 2007 и 2008 гг., грантом областного конкурса научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений, расположенных на территории Челябинской области в 2011 году. Результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции «Разработки Российской Федерации по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники» (г. Челябинск, 2009 г.), четвертой всероссийской научно-практической конференции «Компьютерная интеграция производства и ИПИ технологии» при Оренбургском государственном университете (г. Оренбург, 2009 г.). Работа отмечена дипломом второй степени за лучшую изобретательскую разработку на 5-й Уральской выставке научно-технического творчества молодежи «Евразийские ворота России» (г. Челябинск, 2010 г.).

Работа соответствует специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)» по следующим пунктам паспорта специальности:

4. Разработка алгоритмов решения задач ... обработки информации.

5. Разработка специального математического и программного обеспечения ... обработки информации.

Публикации. По результатам выполненных исследований и разработок опубликовано 11 печатных работ, 3 из которых – в журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка (138 наименований). Основная часть работы содержит 167 страниц, 53 рисунка, 22 таблицы, 6 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, указаны полученные новые результаты, их практическая ценность, представлены положения, выносимые на защиту и описана структура диссертации.

В первой главе описан принцип действия измерительного преобразователя давления, подробно рассмотрены этапы преобразования данных при расчете давления на основе первичной измерительной информации.

В измерительных преобразователях используется микропроцессор, который содержит информацию об определенных характеристиках чувствительного элемента (сенсора), соответствующих входному давлению и температуре. Электронный блок измерительного преобразователя давления компенсирует отклонения этих параметров сенсора. Необходимость процедуры аппроксимации выходной характеристики сенсора возникает в силу того, что применяемые в измерительных преобразователях давления чувствительные элементы характеризуются нелинейностью функций преобразования.

В главе выполнен анализ предшествующих работ по данной тематике. До настоящего времени получили развитие способы построения аппроксимирующих функций с применением глобальных и сегментных методов, представленные в работах Ю.В. Линник, Ю.Г. Свинолупова, Л.А. Семенова, В.Х. Астрахана, Н.А. Данилова, С.А. Голя, Х.М. Хашемиана. Наиболее распространенным алгоритмом определения коэффициентов аппроксимирующих функций является метод наименьших квадратов. В рассмотренных работах в качестве основополагающего критерия при выборе того или иного вида аппроксимирующей функции использована простота математического выражения (показатель сложности математического описания). В настоящее время этот аспект не является столь существенным, поскольку аппаратные возможности современных микропроцессоров позволяют применять практически любые функции преобразования. Вопросы, связанные с алгоритмами определения коэффициентов полиномиальных моделей выходных характеристик в данных работах практически не освещены.

По мнению автора, в литературе недостаточно внимания уделено алгоритмам определения коэффициентов полиномиальных моделей по известному математическому описанию выходной характеристики. Исторически сложилось так, что стандартом в этой области является метод наименьших квадратов, предполагающий минимизацию по среднеквадратичному критерию. Однако, применение данного алгоритма не позволяет удовлетворить специфическим требованиям к измерительным преобразователям давления, применяемым в АСУ ТП.

Вторая глава посвящена разработке специализированных алгоритмов обработки информации при аппроксимации выходных характеристик измерительных преобразователей давления на основе оптимизации по среднеквадратичному критерию. В рамках главы показано, что применение алгебраических полиномов для аппроксимации выходных характеристик измерительных преобразователей является наиболее целесообразным, однако определение коэффициентов полиномиальных моделей с помощью метода наименьших квадратов не позволяет достичь желаемых результатов.

Обоснована целесообразность подбора порядков алгебраических полиномов на этапе аппроксимации выходной характеристики из заданного набора. Порядок полинома по давлению должен быть от третьего до пятого, порядок по температуре от второго до четвертого. Общий вид полинома:

$$\begin{aligned}
 F = & c_0 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot x^2 + c_3 \cdot x^3 + c_4 \cdot x^4 + c_5 \cdot x^5 + \\
 & + c_6 \cdot z + c_7 \cdot x \cdot z + c_8 \cdot x^2 \cdot z + c_9 \cdot x^3 \cdot z + c_{10} \cdot x^4 \cdot z + c_{11} \cdot x^5 \cdot z + \\
 & + c_{12} \cdot z^2 + c_{13} \cdot x \cdot z^2 + c_{14} \cdot x^2 \cdot z^2 + c_{15} \cdot x^3 \cdot z^2 + c_{16} \cdot x^4 \cdot z^2 + c_{17} \cdot x^5 \cdot z^2 + \\
 & + c_{18} \cdot z^3 + c_{19} \cdot x \cdot z^3 + c_{20} \cdot x^2 \cdot z^3 + c_{21} \cdot x^3 \cdot z^3 + c_{22} \cdot x^4 \cdot z^3 + c_{23} \cdot x^5 \cdot z^3 + \\
 & + c_{24} \cdot z^4 + c_{25} \cdot x \cdot z^4 + c_{26} \cdot x^2 \cdot z^4 + c_{27} \cdot x^3 \cdot z^4 + c_{28} \cdot x^4 \cdot z^4 + c_{29} \cdot x^5 \cdot z^4.
 \end{aligned} \tag{1}$$

В том случае, если в ходе аппроксимации будет выбран порядок полинома по давлению или температуре меньше пятого, коэффициенты полинома при соответствующих степенях будут равны нулю.

Определение коэффициентов полиномиальных моделей существенно усложняется плохой обусловленностью системы уравнений, представляющей необходимые условия минимума суммы квадратов отклонений. В рамках работы были рассмотрены методы решения СЛАУ с помощью приведения матрицы к каноническим формам путем ортогональных преобразований. Было показано, что применение сингулярного разложения даёт более эффективные результаты при аппроксимации по сравнению с QR-разложением. Применение сингулярного разложения при решении СЛАУ в совокупности с динамическим подбором порядков аппроксимирующих полиномов повышает точность и надёжность вычислений в случае плохой обусловленности матрицы системы.

Применяемые в качестве средств автоматизации измерительные преобразователи должны обеспечивать предельную точность при работе в определенных температурных условиях. Допускается понижение степени адекватности при изменении температуры относительно нормальных климатических условий (НКУ) на величину, не превышающую значения, определяемого техническими условиями эксплуатации.

Для удовлетворения данному требованию к математической модели необходимо добиться того, чтобы алгебраический полином наиболее полно описывал выходную характеристику измерительного преобразователя при НКУ. Поскольку при аппроксимации используются экспериментальные данные, полученные как при НКУ, так и на краях температурного диапазона, необходимо сделать так, чтобы соответствующие НКУ экспериментальные точки оказывали наибольшее влияние на аппроксимирующую поверхность.

Для решения поставленной задачи предложено применять весовые коэффициенты, а также вариант метода наименьших квадратов, в рамках которого каждой экспериментальной точке присваивается определенный вес. Чем меньше вес конкретной экспериментальной точки, тем меньшее влияние она окажет на аппроксимирующую кривую.

Основная идея взвешенного метода наименьших квадратов сводится к минимизации среднеквадратического отклонения, заданного в виде:

$$E^2 = W \cdot (Y - M_{XZ} \cdot C)^2, \quad (2)$$

где W – диагональная матрица весов.

С использованием весовых коэффициентов формула определения коэффициентов примет вид:

$$C = (M_{XZ}^T \cdot W \cdot M_{XZ})^{-1} M_{XZ}^T \cdot W \cdot Y. \quad (3)$$

Подытожив вышеизложенное, можно сформулировать следующее: если есть необходимость минимизации погрешности измерения давления в определенном температурном диапазоне (как в случае с высокоточными измерительными преобразователями, применяемыми в АСУ ТП поверки средств измерения давления), предлагается присваивать экспериментальным данным, зафиксированном в определенном температурном диапазоне вес, отличный от 1. Веса всех остальных экспериментальных данных должны оставаться равными 1.

$$W_i = \begin{cases} K, & \text{если точка зафиксирована при НКУ;} \\ 1, & \text{если точка зафиксирована не при НКУ.} \end{cases} \quad (4)$$

Величина K должна быть подобрана исходя из допустимой дополнительной погрешности на краях температурного диапазона измерительного преобразователя давления. В качестве критерия оптимизации предложено использовать следующее выражение:

$$F = \min |Cond - E_{border} / E_{normal}|, \quad (5)$$

где $Cond$ – определяемая техническими условиями эксплуатации измерительного преобразователя дополнительная составляющая погрешности на краях температурного диапазона, E_{border} / E_{normal} – отношение максимальной погрешности на краях температурного диапазона к максимальной погрешности при НКУ.

При использовании весовых коэффициентов удастся существенно уменьшить погрешность измерения давления при НКУ. Экспериментально подтверждено, что увеличение погрешности на краях температурного диапазона находится в допустимых пределах. Таким образом, обоснована целесообразность применения взвешенного метода наименьших квадратов в том случае, если необходимо повысить точность в определенном температурном диапазоне.

Результат определения коэффициентов полиномиальной модели может оказаться неудовлетворительным из-за факторов, связанных с погрешностью задания давления при фиксации экспериментальных. Основная сложность состоит в том, что выявить выбросы в массивах экспериментальных данных классическими статистическими методами не представляется возможным ввиду малых величин отклонений. Однако присутствие таких выбросов негативно ска-

зывается на качестве аппроксимации выходных характеристик измерительных преобразователей.

Для устранения нежелательных выбросов из экспериментальных данных автором предложен алгоритм фильтрации с использованием методов интервальной статистики. В основе метода лежит принцип ограниченности погрешностей, хорошо проработанный в рамках интервальной парадигмы. В большинстве случаев фильтр способен обнаружить резко выделяющееся значение, если величина выброса более 10 Па. При этом фильтр отбрасывает (принимает за выбросы) значения, не являющиеся выбросами, что является побочным эффектом работы алгоритма. В том случае, если величина отклонения превышает 30 Па, фильтр однозначно выделяет выброс без ошибок и без исключения «хороших» точек. При малых выбросах (порядка 10 Па), фильтр не даёт надежных результатов.

В главе описано применение датчика измерения углового положения и специального алгоритма для компенсации влияния углового положения на показания измерительного преобразователя абсолютного давления, что позволило существенно уменьшить дополнительную погрешность измерения давления. Дополнительная погрешность, обусловленная изменением углового положения, может составлять до 630 Па, что составляет 0,4 % от диапазона для средств измерения давления с рабочим диапазоном 160 кПа. Таким образом, возникает необходимость компенсации влияния углового положения.

Функциональная схема коррекции показаний представлена на рис. 4.

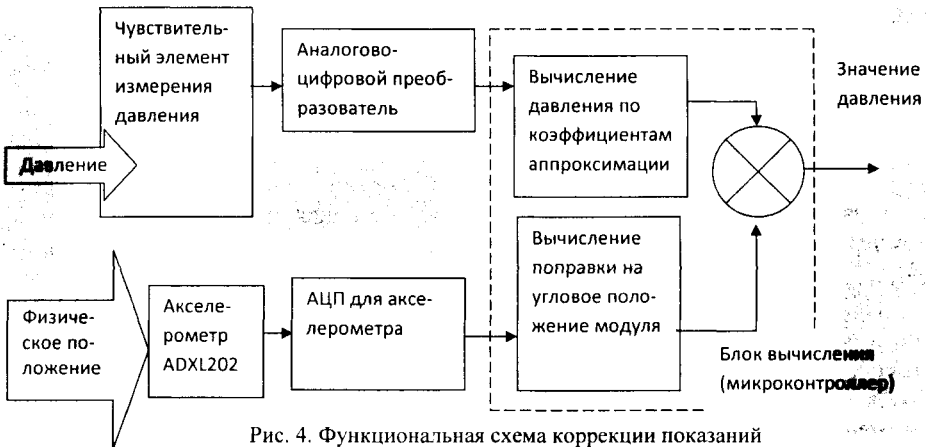


Рис. 4. Функциональная схема коррекции показаний

Для того чтобы вычислить поправку, необходимо провести процедуру калибровки углового положения. Процедура производится после аппроксимации выходной характеристики измерительного преобразователя и записи коэффициентов полиномиальной модели в память измерительного преобразователя при нормальных климатических условиях и атмосферном давлении.

Третья глава посвящена разработке алгоритма определения коэффициентов полиномиальных моделей в соответствии с равномерным критерием оптимизации. Рассмотренные ранее алгоритмы определения коэффициентов полиномиальных моделей на основе метода наименьших квадратов (МНК) базируются на применении математической статистики и регрессионного анализа. Использование описанных алгоритмов возможно только при условии независимости и нормальности распределения случайных погрешностей, которые могут присутствовать только в выходной переменной. Поскольку неопределенность данных может иметь нестатистическую природу и включать систематическую составляющую, ошибки округления и группирования данных, возникают опасения в том, что требуемое условие применимости МНК при аппроксимации выходной характеристики не выполняется.

Альтернативой минимизации в соответствии со среднеквадратичным критерием с целью обеспечения устойчивости рассчитанных оценок при нарушении представленных предпосылок является оптимизация по равномерному критерию, в рамках которого минимизируется максимальная погрешность аппроксимации.

Дополнительным аргументом для рассмотрения указанного подхода является то, что в метрологии принято оценивать точность преобразователя по приведенной погрешности и, следовательно, в качестве критерия оптимизации при определении коэффициентов полиномиальных моделей целесообразно применять именно равномерный критерий, в рамках которого минимизируется абсолютная погрешность (поскольку минимизация максимального значения погрешности приводит к минимизации приведенной погрешности прибора).

Пусть y – экспериментальные значения измеренной переменной, x – значение независимой переменной, $f(x)$ – некоторая функция независимой переменной. Тогда равномерный критерий минимизации можно записать в следующем виде:

$$Q = \max\{|f(x_k) - y_k|\}, k = 1, N. \quad (6)$$

Основная сложность при оптимизации по равномерному критерию состоит в том, что в подлежащем минимизации выражении присутствует недифференцируемый оператор модуля. С этим фактом связано отсутствие работоспособных алгоритмов аппроксимации экспериментальных данных, позволяющих найти решение за конечное число шагов.

Определим целевую функцию, подлежащую минимизации при определении коэффициентов полиномиальных моделей в соответствии с равномерным критерием:

$$F = \max\{|x_i|\}, i = 1, N. \quad (7)$$

То есть после определения коэффициентов, производится вычисление абсолютной погрешности в каждой экспериментальной точке: $E_i = |x_i|$. Вычисляется максимальная величина из набора значений абсолютной погрешности: $\max\{E_i\}, i = 1, N$. Эта величина является математическим выражением критерия

качества построенной математической модели. Задача алгоритма равномерного приближения – минимизировать величину F .

Для реализации алгоритма аппроксимации выходных характеристик измерительных преобразователей давления на основе обозначенного критерия минимизации приведенной погрешности автором предложено использовать итеративную процедуру с применением метода весовых коэффициентов. При расчете весовых коэффициентов решается задача оптимизации: необходимо получить набор весовых коэффициентов, использование которого при определении коэффициентов полиномиальной модели в рамках взвешенного метода наименьших квадратов позволит минимизировать максимальную приведенную погрешность математического описания измерительного преобразователя давления. Рассчитанные коэффициенты не обладают свойством оптимальности с точки зрения минимизации квадратичного функционала, но позволяют минимизировать максимальную погрешность. Это даёт основания утверждать, что данный алгоритм позволяет решить задачу определения коэффициентов аппроксимации выходной характеристики измерительного преобразователя в соответствии с равномерным критерием оптимизации.

Остановимся более подробно на методике определения весовых коэффициентов. Первоначально производится определение коэффициентов с применением стандартного метода наименьших квадратов. Далее рассчитывается величина погрешности математической модели в каждой экспериментальной точке и определяется экспериментальная точка с наибольшей погрешностью. Следующий этап связан с подстройкой весового коэффициента, соответствующего найденной точке. Цель подстройки – сделать так, чтобы погрешность в выбранной точке стала не самой большой (должна присутствовать как минимум одна точка, в которой погрешность больше). Для выполнения данной задачи весовой коэффициент, соответствующий найденной точке, постепенно увеличивается с шагом 0.1, начиная со значения 1.1. После каждого приращения весового коэффициента определяется новый набор коэффициентов полиномиальной модели с применением взвешенного метода наименьших квадратов и рассчитывается абсолютная погрешность в каждой точке. Подбор весового коэффициента прекращается, когда погрешность в рассматриваемой точке становится не самой большой по величине. Подобранный весовой коэффициент, соответствующий выбранной точке, запоминается. Далее аналогичный подбор весового коэффициента производится для новой точки, абсолютная погрешность в которой в настоящий момент наибольшая. Описанная процедура выполняется до тех пор, пока уменьшение погрешности в результате уточнения весового коэффициента в очередной экспериментальной точке превышает заданный порог ε . Чем меньше величина ε , тем большее количество итераций выполняется при определении коэффициентов полиномиальной модели. Тем самым достигается минимизация по равномерному критерию и, следовательно, уменьшение приведенной погрешности измерительного преобразователя.

Сглаживающий эффект от использования весовых коэффициентов для реализации алгоритма равномерного приближения проиллюстрирован на рис. 5.

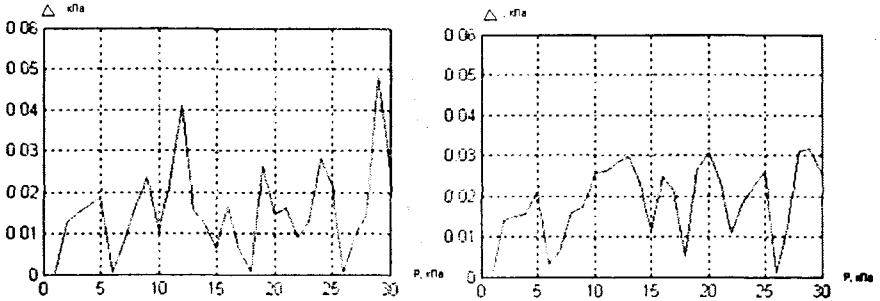


Рис. 5. Значение абсолютной ошибки без применения весовых коэффициентов (слева) и с применением весовых коэффициентов (справа)

На представленном слева графике можно заметить два пиковых значения абсолютной погрешности (41 Па и 48 Па). Таким образом, приведенная погрешность будет составлять: $0,048/30 \cdot 100\% = 0,16\%$. При определении коэффициентов полиномиальных моделей с использованием алгоритма равномерного приближения (график справа) наблюдается «сглаживание» кривой абсолютной погрешности и приведенная погрешность составляет: $0,032/30 \cdot 100\% = 0,11\%$. Таким образом, в данном случае наблюдаем уменьшение приведенной погрешности на 30%. Уменьшение величины абсолютной погрешности без изменения порядка аппроксимирующего полинома достигается за счет того, что погрешность в точках, имеющих на левом графике практически нулевую погрешность, на правом графике возросла. Увеличение погрешности в этих точках не превышает 0,01% от диапазона, что соответствует приведенной погрешности преобразователя давления, при помощи которого на измерительный преобразователь подавалось давление при аппроксимации выходной характеристики.

Введем обозначения, необходимые для описания последовательности шагов алгоритма:

k – число точек ряда нагружения;

P – ряд точек эталонных значений давления (количество точек соответствует k);

X – коды давления (количество кодов соответствует k);

Z – коды температуры (количество кодов соответствует k);

В качестве входных данных используются зафиксированные при различных воздействиях измеренные параметры измерительного преобразователя, а именно считанные при различных давлениях и температурах коды давления АЦП (X) и коды температуры АЦП (Z).

На основе массивов измеренных параметров X и Z формируется матрица A , представляющая собой левую часть СЛАУ:

$$M_{XZ} = \begin{bmatrix} 1 \cdot x_1 \cdot x_1^2 \dots x_1^5 \cdot z_1 \cdot x_1 \cdot z_1 \cdot x_1^2 \dots z_1 \cdot x_1^5 \cdot z_1^2 \cdot x_1 \dots z_1^3 \cdot x_1^5 \dots z_1^4 \dots z_1^4 \cdot x_1^5 \\ 1 \cdot x_2 \cdot x_2^2 \dots x_2^5 \cdot z_2 \cdot x_2 \cdot z_2 \cdot x_2^2 \dots z_2 \cdot x_2^5 \cdot z_2^2 \cdot z_2^2 \cdot x_2 \dots z_2^3 \cdot x_2^5 \dots z_2^4 \dots z_2^4 \cdot x_2^5 \\ \dots \\ 1 \cdot x_i \cdot x_i^2 \dots x_i^5 \cdot z_i \cdot x_i \cdot z_i \cdot x_i^2 \dots z_i \cdot x_i^5 \cdot z_i^2 \cdot z_i^2 \cdot x_i \dots z_i^3 \cdot x_i^5 \dots z_i^4 \dots z_i^4 \cdot x_i^5 \\ \dots \\ 1 \cdot x_k \cdot x_k^2 \dots x_k^5 \cdot z_k \cdot x_k \cdot z_k \cdot x_k^2 \dots z_k \cdot x_k^5 \cdot z_k^2 \cdot z_k^2 \cdot x_k \dots z_k^3 \cdot x_k^5 \dots z_k^4 \dots z_k^4 \cdot x_k^5 \end{bmatrix},$$

$$A = M_{XZ}^T M_{XZ}. \quad (8)$$

Формирование правой части СЛАУ производится по формуле:

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_k \end{bmatrix},$$

$$B = M_{XZ}^T P. \quad (9)$$

Результатом решения уравнения

$$M_{XZ}^T M_{XZ} \cdot C = M_{XZ}^T P \quad (10)$$

является набор коэффициентов, используемый на первой итерации.

Далее производится численное моделирование, в ходе которого в математическую модель с коэффициентами полиномиальной модели подставляются значения кодов температуры и давления (X и Z). Полученные значения точек по давлению сравниваются со значениями давления из массива образцовых значений давления P . Таким образом, вычисляется погрешность математической модели с рассчитанными коэффициентами:

$$E_i = p_i - (c_0 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot x^2 + c_3 \cdot x^3 + c_4 \cdot x^4 + c_5 \cdot x^5 + c_6 \cdot z + c_7 \cdot x \cdot z + c_8 \cdot x^2 \cdot z + c_9 \cdot x^3 \cdot z + c_{10} \cdot x^4 \cdot z + c_{11} \cdot x^5 \cdot z + c_{12} \cdot z^2 + c_{13} \cdot x \cdot z^2 + c_{14} \cdot x^2 \cdot z^2 + c_{15} \cdot x^3 \cdot z^2 + c_{16} \cdot x^4 \cdot z^2 + c_{17} \cdot x^5 \cdot z^2 + c_{18} \cdot z^3 + c_{19} \cdot x \cdot z^3 + c_{20} \cdot x^2 \cdot z^3 + c_{21} \cdot x^3 \cdot z^3 + c_{22} \cdot x^4 \cdot z^3 + c_{23} \cdot x^5 \cdot z^3 + c_{24} \cdot z^4 + c_{25} \cdot x \cdot z^4 + c_{26} \cdot x^2 \cdot z^4 + c_{27} \cdot x^3 \cdot z^4 + c_{28} \cdot x^4 \cdot z^4 + c_{29} \cdot x^5 \cdot z^4).$$

$$(11)$$

Находится экспериментальная точка с наибольшим значением **абсолютной** погрешности:

$$E_{\max} = \max\{E_i\}. \quad (12)$$

Для точки с наибольшим значением погрешности производится итеративный подбор весового коэффициента. Используются значения, начиная с 1.1. с шагом 0.1. После каждого инкремента весового коэффициента производится расчет набора коэффициентов с использованием матрицы весов:

$$C = (M_{XZ}^T \cdot W \cdot M_{XZ})^{-1} M_{XZ}^T \cdot W \cdot P \quad (13)$$

После чего повторно определяется погрешность в каждой экспериментальной точке. Итерации по подбору весового коэффициента заканчиваются, как только абсолютная погрешность в рассматриваемой точке становится не

максимальной (присутствует как минимум одна точка, в которой погрешность больше). Подобранный вес для экспериментальной точки запоминается.

Аналогичная процедура подстройки весового коэффициента производится над следующей точкой, в которой на данный момент зафиксирована наибольшая погрешность. После подстройки каждого весового коэффициента вычисляется оценка математической модели, равная максимальной приведенной погрешности: $F_k = \max\{|x_i|\}, i=1, N$.

Критерий окончания итерации по подстройке всех весовых точек формулируется следующим образом: $|F_k - F_{k-1}| < \varepsilon$

То есть оценка математической модели после выполнении последней итерации изменилась не очень сильно. Величина ε выбирается исходя из возможностей аппаратного обеспечения персонального компьютера, на котором выполняются вычисления. Рекомендуемое значение $\varepsilon = 10^{-4} / \text{Range}$, где Range – верхний предел измерения. Применение критерия остановки итераций вида $F_k > F_{k-1}$ не даёт результатов. В этом случае итерационный процесс быстро сходится в локальном экстремуме.

Блок схема алгоритма представлена на рис. 6.

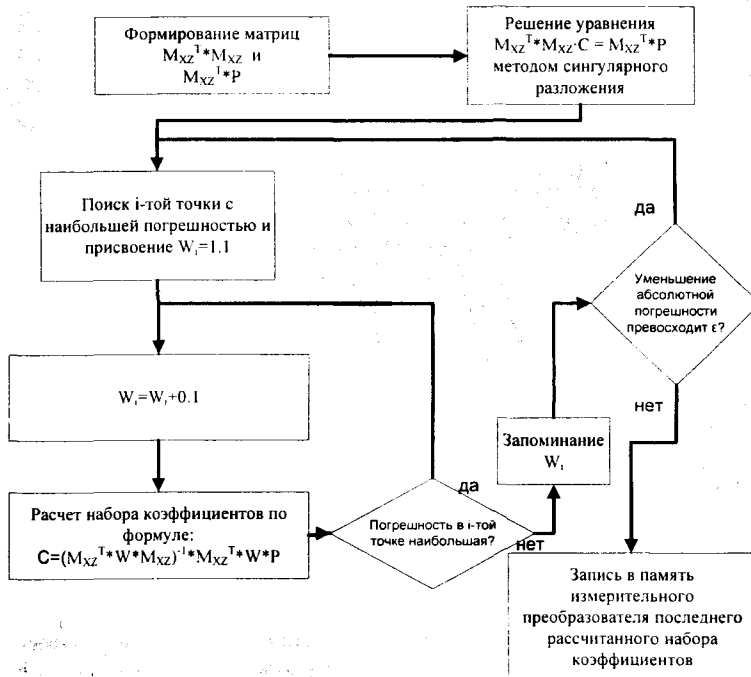


Рис. 6. Упрощенная блок-схема расчета коэффициентов

Как было отмечено ранее, измерительные преобразователи, применяемые в качестве средств автоматизации, должны обеспечивать предельную точность при работе в определенном температурном диапазоне (при НКУ). Поставим задачу усовершенствования представленного ранее алгоритма на основе оптимизации по равномерному критерию для удовлетворения данному требованию.

Задача решается внесением некоторых изменений в представленный алгоритм. Основная идея изменений состоит в следующем: подстройка весовых коэффициентов производится не для всех экспериментальных точек, а только для точек, зафиксированных при НКУ. В результате расчета весовые коэффициенты экспериментальных точек, не соответствующих НКУ остаются равными 1 и увеличение значений весовых коэффициентов производится только в точках, зафиксированных при НКУ.

На рис. 7 показано, каким именно точкам были присвоены веса. Цифрой 1 отмечена кривая, соответствующая графику погрешности до выполнения итеративной подстройки весовых коэффициентов (значения всех весовых коэффициентов равны 1). Под цифрой 2 представлена абсолютная погрешность после уточнения весовых коэффициентов. Из рисунка видно, что наибольшие весовые коэффициенты присвоены экспериментальным данным, изначально имеющим наибольшую погрешность.

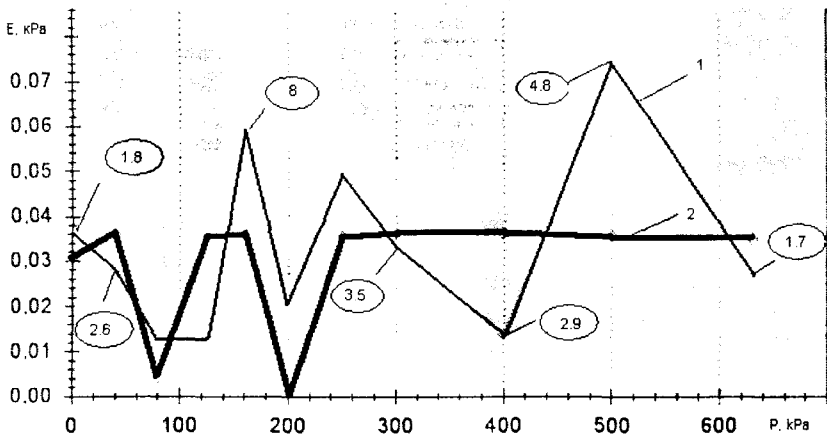


Рис. 7. Абсолютная погрешность при использовании итерационного алгоритма при аппроксимации измерительного преобразователя с диапазоном 630 Па:

- 1 — Результат расчета на первой итерации (максимальная погрешность 72 Па),
 2 — Результат расчета после окончания всех итераций (максимальная погрешность 37 Па)
 (кругами выделены окончательные значения весовых коэффициентов)

Приведем численные значения, характеризующие повышение точности в процентах при использовании алгоритма равномерного приближения по сравнению со стандартным методом наименьших квадратов (табл. 1).

Моделирование с применением разработанного алгоритма и исследуемых измерительных преобразователей давления показало эффективность алгоритма по сравнению со стандартными способами: повышение точности составило от 40 до 74% в зависимости от индивидуальных особенностей выходных характеристик измерительных преобразователей. Данный результат позволит повысить класс точности измерительных преобразователей давления.

Таблица 1

Сравнение алгоритмов определения коэффициентов

№	Диапазон измерения, кПа	Макс. погрешность при минимизации квадратичного функционала, Па	Макс. погрешность при применении алгоритма равномерного приближения, Па	Макс. погрешность при применении алгоритма равномерного приближения при НКУ, Па	Повышение точности (сравнение алгоритмов 1 и 3), %
1	2,5	0,168	0,14	0,101	40
2	25	1,11	0,54	0,43	61
3	160	3,12	1,96	0,87	72
4	0,63	0,095	0,056	0,036	62
5	6,3	0,423	0,184	0,115	73
6	6,3	1,37	0,39	0,35	74

Четвертая глава посвящена вопросам программной реализации алгоритмов и экспериментальному исследованию их эффективности.

Экспериментальное исследование предложенных алгоритмов проведено с применением высокоточных измерительных преобразователей, применяемых в системах автоматизированного контроля средств измерения давления. Для достижения требуемой точности измерительных преобразователей давления предложено применять разработанные алгоритмы аппроксимации выходных характеристик при производстве. В этом случае процедура аппроксимации предполагает калибровку измерительных преобразователей для повышения их точности.

Необходимость калибровки измерительного устройства возникает в том случае, если производственные допуски на чувствительный элемент измерительного устройства или допуски на схему преобразования сигналов превышают требуемую точность системы. В процессе проведения калибровки определяются коэффициенты, описывающие передаточную функцию всей системы в целом, включая чувствительный элемент, интерфейсное устройство и АЦП. Для проведения калибровки измерительных устройств важно иметь точные физические эталоны, позволяющие моделировать соответствующие внешние воздействия.

Для применения разработанного в рамках данной работы алгоритмического обеспечения определения коэффициентов полиномиальных моделей должны быть учтены следующие ограничения:

1. Измерительный преобразователь давления должен содержать микропроцессор с тактовой частотой не менее 100 кГц и блок энергонезависимой памяти (не менее 100 байт) для хранения коэффициентов полиномиальной модели.

2. Выходная характеристика измерительного преобразователя давления должна с высокой степенью адекватности описываться полиномом до пятого порядка включительно.

3. Имеется возможность использовать образцовые задатчики давления, имеющие, как минимум, вдвое меньшую погрешность, чем требования к калибруемому измерительному преобразователю давления.

Необходимо модифицировать программное обеспечение, функционирующее в микроконтроллере измерительного преобразователя. Формула расчета давления по значениям кодов давления и температуры должна иметь следующий вид:

$$P(t, d) = r_0 + d \cdot (r_1 + d \cdot (r_2 + d \cdot (r_3 + d \cdot (r_4 + d \cdot r_5))),$$

$$\text{где } r_0 = q_0 + t \cdot (q_1 + t \cdot (q_2 + t \cdot (q_3 + t \cdot q_4))),$$

$$r_1 = q_5 + t \cdot (q_6 + t \cdot (q_7 + t \cdot (q_8 + t \cdot q_9))),$$

$$r_2 = q_{10} + t \cdot (q_{11} + t \cdot (q_{12} + t \cdot (q_{13} + t \cdot q_{14}))),$$

$$r_3 = q_{15} + t \cdot (q_{16} + t \cdot (q_{17} + t \cdot (q_{18} + t \cdot q_{19}))),$$

$$r_4 = q_{20} + t \cdot (q_{21} + t \cdot (q_{22} + t \cdot (q_{23} + t \cdot q_{24}))),$$

$$r_5 = q_{25} + t \cdot (q_{26} + t \cdot (q_{27} + t \cdot (q_{28} + t \cdot q_{29}))),$$

d – код давления, считанный с АЦП,

t – код температуры, считанный с АЦП,

q – набор калибровочных коэффициентов.

(14)

Поправка для компенсации влияния углового положения измерительного преобразователя при наличии встроенного датчика углового положения рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{дф}}(A) = q_{a0} + q_{a1} \cdot A^1 + q_{a2} \cdot A^2 + q_{a3} \cdot A^3 + q_{a4} \cdot A^4 + q_{a5} \cdot A^5, \text{ где}$$

A – код, полученный с АЦП датчика углового положения,

q_a – набор коэффициентов для коррекции влияния углового положения

(15)

Полученная поправка прибавляется к значению давления P , рассчитанному на предыдущем этапе.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность разработанных алгоритмов аппроксимации выходной характеристики измерительных преобразователей давления по сравнению с применением стандартного метода наименьших квадратов. По результатам экспериментальных исследований сделан вывод о том, что наименьшая приведенная погрешность высокоточных измерительных преобразователей давления достигается при использовании алгоритма равномерного приближения для определения коэффициентов полиномиальных моделей аппроксимирующих функций.

Разработанный в рамках работы алгоритм аппроксимации выходных характеристик измерительных преобразователей давления апробирован при серийном выпуске высокоточных модулей Метран-518, выпускаемых ЗАО «ГП

«МЕТРАН». Требуемая точность модулей давления Метран-518 обеспечена благодаря разработанному алгоритму аппроксимации выходных характеристик, разработанному в рамках данной диссертационной работы. Заявленная точность подтверждена протоколом испытаний с целью утверждения типа калибратора давления портативного Метран-517 при представителе ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложены и исследованы алгоритмы аппроксимации выходных характеристик измерительных преобразователей давления, в основе которых лежит обработка измерительной информации, полученной с применением прецизионных контроллеров давления. В итоге получены следующие результаты и выводы:

1. Разработано алгоритмическое обеспечение аппроксимации выходных характеристик измерительных преобразователей давления с возможностью динамического подбора порядков аппроксимирующих полиномов на этапе расчета. Применение сингулярного разложения при решении системы линейных алгебраических уравнений в совокупности с выбором порядков аппроксимирующих полиномов по давлению и температуре в процессе аппроксимации позволяет существенно повысить точность и надежность вычислений при определении коэффициентов полиномиальных моделей аппроксимирующих функций измерительных преобразователей давления, применяемых в АСУ ТП.

2. Разработан специализированный алгоритм обработки информации, позволяющий повысить точность измерения давления в определенном температурном диапазоне. В основе алгоритма лежит методика определения весовых коэффициентов в рамках применения взвешенного метода наименьших квадратов. Весовой коэффициент зафиксированных при нормальных климатических условиях экспериментальных данных предложено определять исходя их допустимой дополнительной погрешности на краях температурного диапазона измерительного преобразователя давления.

3. Разработан итерационный алгоритм равномерного приближения для аппроксимации выходных характеристик измерительных преобразователей давления, при помощи которого решается задача минимизации максимальной величины приведенной погрешности преобразователя во всем диапазоне измерения.

4. Разработано программное обеспечение аппроксимации выходных характеристик измерительных преобразователей давления для АСУ ТП в соответствии с предложенным алгоритмом равномерного приближения. Программное обеспечение выполнено в виде подключаемого модуля на языке С#.

5. Экспериментальные исследования алгоритма определения коэффициентов полиномиальных моделей в соответствии с равномерным критерием оптимизации на высокоточных измерительных преобразователях давления подтвердили эффективность алгоритма по сравнению со стандартным методом наи-

меньших квадратов. Результаты экспериментов и моделирования подтверждают теоретические положения, высказанные в рамках работы.

6. Разработан новый способ компенсации влияния углового положения на показания измерительного преобразователя давления, в результате чего существенно уменьшена дополнительная погрешность измерения давления, возникающая вследствие изменения положения преобразователя относительно нормали к земной поверхности. В основе предложенного алгоритма лежит обработка измерительной информации, полученной от установленного на измерительном преобразователе акселерометра.

7. Предложен новый алгоритм отсева резко выделяющихся значений из экспериментальных данных для аппроксимации на основе методов интервальной статистики. Алгоритм реализован в виде программы на языке C#.

Публикации по теме диссертационной работы

В ведущих рецензируемых научных журналах ВАК:

1. Попов, А.Е. Использование двухпараметрических математических моделей для аппроксимации функций преобразования давления / А.Е. Попов, А.В. Лазуков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управления, радиоэлектроника». – 2008. – Вып. 7. – № 3(103). – С. 38–40.

2. Попов, А.Е. Применение методов интервального анализа при калибровке преобразователей давления / А.Е. Попов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управления, радиоэлектроника». – 2009. – Вып. 10. – № 26(159). – С. 87–90.

3. Попов, А.Е. Алгоритм калибровки эталонных измерительных преобразователей давления / А.Е. Попов, А.Г. Щипицын // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управления, радиоэлектроника». – 2010. – Вып. 12. – № 22(198). – С. 53–56.

В других изданиях:

4. Попов, А.Е. Подходы к разработке математического и алгоритмического обеспечения калибровки измерительных преобразователей давления / А.Е. Попов, А.Г. Щипицын // ЮУрГУ – Челябинск, 2008. – 20 с. – ВИНТИ 25.12.2008, №1009–В2008

5. Свидетельство РОСПАТЕНТ № 2009610839. Статистический анализ калибровочных данных с целью выявления резко выделяющихся значений / А.Е. Попов – 2009.

6. Свидетельство РОСПАТЕНТ № 2010610556. Автоматизация характеристики эталонных измерительных преобразователей давления / А.Е. Попов – 2010.

7. Патент на изобретение № 2402001. Устройство измерения давления с встроенным в него датчиком углового положения и способ подготовки его к эксплуатации / А.Е. Попов, А.В. Сысолякин – 2010.

8. Попов, А.Е. Программное обеспечение для автоматизации процедуры стендовой калибровки измерительных преобразователей давления / А.Е. Попов // Четвертая всероссийская научно-практическая конференция «Компьютерная интеграция производства и ИПИ технологии: сборник материалов. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – С. 536–538.

9. Попов, А.Е. Автоматизация процедуры стендовой калибровки измерительных преобразователей давления / А.Е. Попов // Системы управления и информационные технологии: темат. сб. науч. тр. / редкол.: А.Г. Щипицын (гл. ред.) и др. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – С. 244–249.

10. Попов, А.Е. Математическое и алгоритмическое обеспечение калибровки эталонных преобразователей давления / А.Е. Попов, А.Г. Щипицын // Наука ЮУрГУ: материалы 61-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – Т. 2. – С. 49–53.

11. Попов, А.Е. // Задачи разработки программного обеспечения калибровки эталонных измерительных преобразователей давления / А.Е. Попов, А.Г. Щипицын // Наука ЮУрГУ: материалы 62-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т. 2. – С. 178–181.