

05.13.14
С 60

На правах рукописи

Солдаткин
СОЛДАТКИНА Екатерина Валерьевна

**АЛГОРИТМЫ АДАПТАЦИИ
ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
К МИНИМУМУ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ**

Специальность 05.13.14. — «Системы обработки информации и управления»

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

Челябинск — 2000

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Информационно-измерительная техника» Южно-Уральского государственного университета.

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Казаринов Л.С.;
кандидат технических наук,
Кощеев А.А.

Ведущее предприятие — федеральное государственное унитарное предприятие
«Государственный ракетный центр
«КБ им. академика В.П. Макеева», г. Миасс.

Защита состоится 29 июня 2000 г., в 15⁰⁰ ч, на заседании диссертационного совета Д053.13.06 при Южно-Уральском государственном университете по адресу:
454080, г. Челябинск, пр. им. Ленина, 76 (ауд. 244).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан 26 мая 2000 г.

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

Устюгов М.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема повышения точности, несомненно, — одна из центральных в измерительной технике. Ее успешное решение не только всегда являлось необходимым условием дальнейшего совершенствования средств измерений, но и оказывало стимулирующее влияние на многие смежные отрасли науки, техники и эксперимента, испытывающие потребность в точных измерениях. Измерения, выполняемые в динамическом режиме, например в наземных испытательно-измерительных комплексах, характеризуются динамической погрешностью, обусловленной инерционностью первичного измерительного преобразователя и случайными шумами, присутствующими на его выходе. Данная составляющая погрешности измерения оказывается существенно больше всех других составляющих погрешности. В случае сопряжения испытательных комплексов с современными вычислительными средствами и введения дополнительной математической обработки результатов испытаний можно значительно повысить точность измерений, улучшить метрологические характеристики испытательных систем и значительно расширить функциональные возможности существующих датчиков. Это повышает эффективность испытаний при создании новых образцов техники без дополнительных материальных затрат.

Поэтому актуальным является вопрос разработки динамических моделей измерительных систем с настраиваемыми параметрами и алгоритмов обработки данных динамических измерений, оптимально настраивающихся по точности под оценку динамической погрешности. Внедрение таких алгоритмов и их прикладного программного обеспечения позволит создавать интеллектуальные системы со способностью к индивидуализации своих параметров под реальные условия проведения измерений и конкретный экземпляр системы.

Объектом исследования являются линейные измерительные системы, в которых динамическая погрешность является основной составляющей общей погрешности.

Предметом исследования являются методы, средства и алгоритмы построения измерительных систем с модальным управлением динамическими, методы построения самонастраивающихся измерительных систем и алгоритмы эффективного уменьшения оценки динамической погрешности измерения.

Цель работы заключается в повышении динамической точности информационно-измерительных систем на основе динамических моделей

тем с модальным управлением динамическими характеристиками и алгоритмов адаптации их параметров к минимуму оценки динамической погрешности.

Методы исследования базируются на использовании методов структурной теории автоматического управления, градиентного метода синтеза самонастраивающихся систем управления, численных методов решения экстремальных задач. Устойчивость системы анализировалась по прямому методу Ляпунова. Экспериментальные исследования выполнены с помощью моделирования на компьютере.

Достоверность и обоснованность. Математические модели и алгоритмы, предложенные в работе, основаны на фундаментальных положениях теории систем автоматического регулирования. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена корректным применением математического аппарата, использованием современных вычислительных средств, совпадением результатов восстановления экспериментального измеряемого сигнала с использованием двух различных алгоритмов, результатами моделирования восстановленного сигнала.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. На основе динамической модели измерительной системы с модальным управлением динамическими параметрами и дополнительным каналом оценки динамической погрешности, учитывющей присутствие реальных шумов и помех, приведенных к выходу первичного датчика, разработан и исследован новый алгоритм подстройки параметров измерительной системы на основе метода прямого поиска.
2. На основе градиентного метода построения самонастраивающихся систем разработана и проанализирована динамическая модель самонастраивающейся измерительной системы динамических параметров. Выявлены факторы, влияющие на устойчивость полученной измерительной системы. Создан новый алгоритм самонастройки динамических параметров измерительной системы к минимуму оценки динамической погрешности.
3. Разработана и исследована динамическая модель самонастраивающейся измерительной системы динамических параметров с подстройкой только одного динамического параметра измерительной системы.

Практическая ценность полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработанный алгоритм настройки динамических параметров на основе метода прямого поиска позволяет уменьшить динамическую погрешность измерения. Алгоритм предусматривает контроль адекватности динамической погрешности и оценки этой погрешности, учитывающие априорную информацию о частотных

свойствах измеряемого сигнала, сигнала шума и динамических характеристиках измерительной системы, что повышает достоверность полученных результатов.

2. Разработанный алгоритм самонастройки динамических параметров измерительной системы обеспечивает существенное уменьшение динамической погрешности измерений и обладает свойством адаптации к минимуму оценки динамической погрешности в условиях отсутствия априорной информации о частотных свойствах измеряемого сигнала и сигнала шума, присутствующего на выходе первичного датчика.

3. Проведена модификация алгоритма самонастройки динамических параметров измерительной системы для самонастройки одного динамического параметра, что упрощает схему расчета параметров измерительной системы и позволяет уменьшить динамическую погрешность измерений для датчика любого порядка.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на: Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых «Информационные и кибернетические системы управления и их элементы» (г. Уфа, 1996 г.); Второй Всероссийской научно-технической конференции «Методы и средства измерений физических величин» (г. Нижний Новгород, 1997 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Новые методы, технические средства и технологии получения измерительной информации» (г. Уфа, 1997 г.); 52 научно-технической конференции при Южно-Уральском государственном университете (г. Челябинск, 2000 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований и разработок опубликовано 7 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы (108 наименований) и приложения. Основная часть работы содержит 160 с., 54 рис., 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи исследования, указаны научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе рассмотрены структуры информационно-измерительных систем и проведен анализ состояния исследований в области теории динамических измерений. До настоящего времени получили развитие методы восстановления динамически искаженного сигнала на основе метода регуляризации А.Н. Тихоно-

ва, приводящие к необходимости использовать обратное преобразование Фурье, представленные, например, в работах Грановского В.А. и Солонченко Г.Н., и методы восстановления на основе численного решения интегрального уравнения свертки. Наиболее полно этот метод решения рассмотрен в работах А.Ф. Верлань.

При этом во всех работах присутствует только точечная оценка динамической погрешности, а при измерении быстроизменяющихся сигналов необходима оценка динамической погрешности восстановления измеряемой величины как функции времени. Практически отсутствуют результаты по оценке погрешности измерения по имеющемуся выходному сигналу средства измерения и информации о его динамических характеристиках. Не ставились специально вопросы эффективной коррекции динамической погрешности с пониженной чувствительностью к наличию шумов первичного измерительного преобразователя. Более того, в реальных информационно-измерительных системах характеристики шумов, присутствующих в выходном сигнале датчика, известны приближенно и могут изменяться в процессе измерения. Не достаточно разработаны вопросы адаптации параметров датчиков и измерительных систем к условиям проведения эксперимента, большинство результатов получено для систем с постоянными параметрами. Это ограничивает точность измерительных систем характеристиками аппаратуры и не позволяет использовать вычислительный потенциал этих систем для существенного улучшения их метрологических характеристик.

В настоящее время анализ динамических погрешностей рассматривается часто как самостоятельная проблема. Ряд методов анализа динамической погрешности приведен в работах В.А. Грановского. Вопросы определения коэффициентов передаточных функций средства измерения по экспериментальным данным и понижения порядка передаточной функции рассматриваются в работах В.В. Леонова.

Разработка вопросов анализа динамической погрешности и ее коррекции методами структурной теории автоматического управления приведена в работах А.Л. Шестакова. Данный подход позволяет получить динамические модели измерительных систем с модальным управлением динамическими характеристиками. Более того, при таком подходе возможно создание адаптивных измерительных систем, которые предполагают изменение своих динамических параметров на основе получаемой измерительной информации. Создание таких интеллектуальных измерительных систем является перспективным направлением в области теории динамических измерений.

Учитывая сказанное, задача разработки динамических моделей измерительных систем с модальным управлением динамическими параметрами и алгоритмов об-

работки данных динамических измерений, оптимально настраивающихся по точности под оценку динамической погрешности и условия проведения измерений, является весьма актуальной. Успешное ее решение значительно улучшит метрологические характеристики и эффективность существующих дорогостоящих наземных испытательно-измерительных комплексов без значительных материальных затрат за счет глубокой математической обработки результатов измерений.

Во второй главе рассмотрена динамическая модель измерительной системы с модальным управлением динамическими параметрами и дополнительным каналом оценки динамической погрешности, учитывающая наличие приведенного сигнала шума на выходе первичного датчика. Разработан алгоритм настройки параметров измерительной системы на основе метода прямого поиска, адаптивный к минимуму оценки динамической погрешности. Получены условия достоверности динамической погрешности и оценки этой погрешности, учитывающие априорную информацию о частотных свойствах или спектральных плотностях измеряемого сигнала, сигнала шума и динамических характеристиках измерительной системы.

Настройка параметров измерительной системы с целью уменьшения динамической погрешности измерений невозможна без оценки динамической погрешности непосредственно в процессе измерения. Поэтому в работе использована динамическая модель измерительной системы с модальным управлением динамическими характеристиками, предложенная в работах А.Л. Шестакова, с дополнительным каналом оценки динамической погрешности. В модели учтено наличие приведенного сигнала шума на выходе первичного датчика.

Динамическая модель измерительной системы (рис. 1.) включает в себя полную динамическую модель датчика, выход которого связан с аналогичной полной динамической моделью, охваченной обратными связями с изменяемыми коэффициентами k_0, k_1, \dots, k_{n-1} и дополнительный канал оценки динамической погрешности. Критерием настройки коэффициентов обратных связей измерительной системы k_0, k_1, \dots, k_{n-1} служит близость выходных сигналов датчика, и его модели.

Получено выражение для передаточной функции измерительной системы при отсутствии шума, приведенного к выходу датчика:

$$W_{\text{ис}}(p) = \left. \frac{U^*(p)}{U(p)} \right|_{U(p)=0} = \frac{b_n p^n + \dots + b_1 p + b_0}{p^n + (a_{n-1} - k_{n-1})p^{n-1} + \dots + (a_1 - k_1)p + (a_0 - k_0)}, \quad (1)$$

где $U(p)$ — изображение выходного сигнала датчика; $U^*(p)$ — изображение выходного сигнала измерительной системы, приведенное к единичному коэффи-

шненту усиления; $a_{n-1}, \dots, a_1, a_0, b_m, \dots, b_1, b_0$ — постоянные коэффициенты ($m \leq n$); $V(p)$ — изображение высокочастотного шума на выходе датчика; p — комплексная переменная.

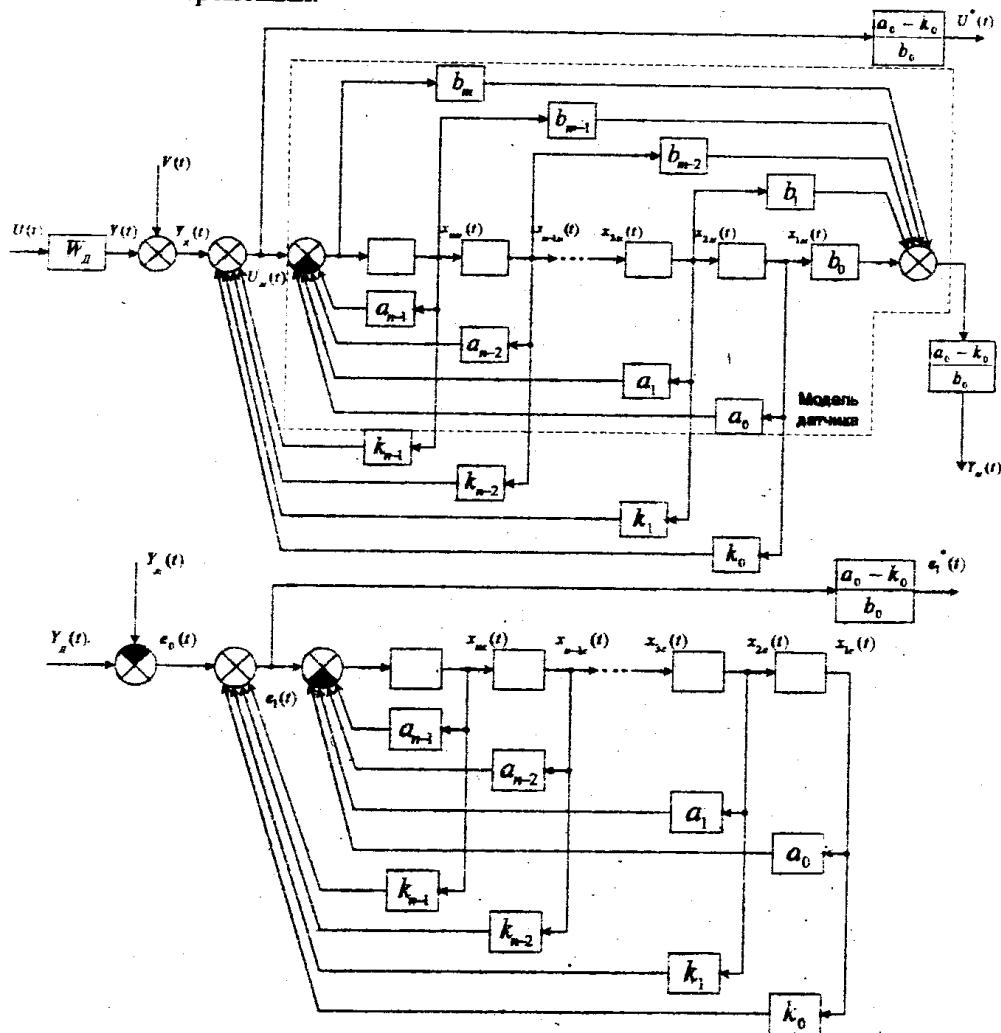


Рис. 1. Структурная схема измерительной системы динамических параметров с каналом оценки динамической погрешности

Передаточная функция измерительной системы по приведенной шумовой составляющей, определенная в отсутствие полезного входного сигнала имеет вид

$$W_{\text{шум}}(p) = \frac{U^*(p)}{V(p)} \Big|_{U(p)=0} = \frac{p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \dots + a_1p + a_0}{p^n + (a_{n-1} - k_{n-1})p^{n-1} + \dots + (a_1 - k_1)p + (a_0 - k_0)} = \frac{W_{uc}(p)}{W_D(p)}, \quad (2)$$

где $W_D(p)$ — передаточная функция датчика.

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что, изменяя настраиваемые параметры k_0, k_1, \dots, k_{n-1} , можно получить любую желаемую передаточную функцию измерительной системы, причем каждый настраиваемый параметр влияет на один коэффициент передаточной функции. При изменении этих параметров изменяется и передаточная функция по приведенной шумовой составляющей, что приводит к усилению шума в выходном сигнале измерительной системы.

На вход канала оценки динамической погрешности измерительной системы подается сигнал, вид которого аналогичен виду сигнала на входе корректирующего устройства измерительной системы:

$$e_0(p) = y_D(p) - y_M(p) \frac{a_0 - k_0}{b_0} = (U(p) - U^*(p)) W_D(p) + V(p) = e_{uc}(p) W_D(p) + V(p), \quad (3)$$

где $e_{uc}(p) = U(p) - U^*(p)$ — изображение погрешности измерительной системы.

Это позволило скорректировать оценку погрешности тем же способом, что и сигнал датчика.

Передаточная функция канала оценки динамической погрешности при отсутствии на выходе датчика шума имеет вид

$$W_e(p) = \left| \frac{e_1^*(p)}{e_{uc}(p)} \right|_{V(p)=0} = \frac{b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0}{p^n + (a_{n-1} - k_{n-1}) p^{n-1} + \dots + (a_1 - k_1) p + (a_0 - k_0)} \frac{a_0 - k_0}{b_0}, \quad (4)$$

где e_1^* — изображение выходного сигнала канала оценки погрешности.

Передаточная функция канала оценки динамической по приведенной шумовой составляющей, определенная в отсутствие полезного входного сигнала имеет вид

$$W_{\text{шум}}(p) = \left| \frac{e_1^*(p)}{e_{uc}(p)} \right|_{U(p)=0} = \frac{\frac{V(p)}{W_D(p)} \cdot (1 - W_{uc}(p))}{\frac{V(p)}{W_D(p)} \cdot \frac{W_{uc}(p)}{W_D(p)}} = 1 - W_{uc}(p). \quad (5)$$

Передаточные функции (4), (5) имеют вид, аналогичный передаточным функциям измерительной системы и настраиваемые параметры канала оценки k_0, k_1, \dots, k_{n-1} влияют на ее коэффициенты аналогичным образом. Поэтому, критерием настройки коэффициентов k_0, k_1, \dots, k_{n-1} на их оптимальное для данной оценки динамической погрешности измерительной системы значение можно считать минимум среднеквадратического отклонения сигнала оценки динамической погрешности, получаемой из дополнительного канала оценки.

При этом получение оптимальных передаточных функций $W_{uc}(p)$ и $W_{шум}(p)$ требует управления всеми настраиваемыми параметрами. Для систем большого порядка прямое управление всеми k_i , $i=0, n-1$, параметрами сопряжено с большими вычислительными трудностями и на практике сложно реализуемо. Поэтому процесс подстройки параметров измерительной системы под оценку динамической погрешности, получаемой из дополнительного канала, осуществляется по одному обобщенному параметру — δ , с которым связаны все нули и полюса в передаточной функции измерительной системы.

Изменение настраиваемого параметра приводит к изменению постоянных времени всей измерительной системы. С одной стороны, это уменьшает собственную динамическую погрешность измерительной системы за счет расширения полосы пропускания, а с другой стороны, происходит заметное усиление шума в выходном сигнале измерительной системы. Поэтому за оптимальное принимается то значение настраиваемого параметра, на котором достигается минимум среднеквадратического отклонения сигнала оценки динамической погрешности. Для нахождения минимума функции $e_1(\delta)$ использован оптимальный последовательный алгоритмом поиска экстремума функции — модифицированный метод золотого сечения, который обеспечивает требуемую точность и скорость сходимости алгоритма к наилучшему значению настраиваемого параметра, при котором оценка динамической погрешности измерительной системы минимальна.

Существенным моментом в алгоритме поиска настраиваемого параметра измерительной системы, обеспечивающего минимальную суммарную динамическую погрешность, является текущий контроль достоверности оценки динамической погрешности $e_1(\delta)$, получаемой из дополнительного канала оценки. Достоверность сигнала оценки динамической погрешности, оценивается относительно истинной погрешности измерительной системы, для чего ограничена разность между изображениями Фурье истинного значения погрешности и ее оценкой, полученной из дополнительного канала динамической оценки:

$$|e_{uc}(j\omega) - e_1(j\omega)| \leq \varepsilon, \quad (6)$$

где ε — максимально допустимое расхождение между истинной динамической погрешностью измерительной системы и ее оценкой из канала оценки.

Из выражения (6) было получено условие адекватной оценки собственно динамической погрешности при наличии априорной информации о предельных частотах входного сигнала и сигнала шума:

$$1 - \varepsilon_1 \leq |W_{uc}(j\omega_{сигн})| \leq 1 + \varepsilon_1, \quad (7)$$

где ε_1 — малая величина; $\omega_{сигн}$ — циклическая частота входного измеряемого сигнала. Условие адекватной оценки шумовой составляющей погрешности при гармоническом шумовом сигнале принимает вид

$$|W_{uc}(j\omega_u)| \leq \varepsilon_2. \quad (8)$$

где ε_2 — малая величина; ω_u — циклическая частота шумового сигнала.

Условия из выражений (7) и (8) накладывают ограничения на максимальную частоту измеряемого сигнала и минимальную частоту сигнала шума, определяя, таким образом, границы применения алгоритма поиска оптимального параметра и требуя априорной информации об измеряемом и шумовом воздействии.

Если известны спектральные плотности или граничные частоты измеряемого воздействия и шума первичного измерительного преобразователя, то метод последовательного поиска в алгоритме настройки динамических параметров измерительной системы, адаптивном к оценке погрешности, применим и при случайному характере сигналов измерительной системы. В этом случае, ограничивая разность между спектральными плотностями сигналов истинной динамической погрешности и ее оценкой малой величиной, условия достоверности оценки динамической погрешности, на основании которой принимается решение об оптимальной точности измерительной системы примут вид

$$S_U(\omega) \left(1 - |W_{uc}(j\omega)|^2\right) \leq \varepsilon_2 \quad \text{при } \omega_{сигн_min} \leq \omega \leq \omega_{сигн_max}, \quad (9)$$

$$S_U(\omega) \cdot \frac{\left(|W_{uc}(j\omega)|^2\right)^2}{|W_D(j\omega)|^2} \leq \varepsilon_3 \quad \text{при } \omega_u_{min} \leq \omega \leq \omega_u_{max}, \quad (10)$$

где ε_2 и ε_3 — малые величины; $S_U(\omega)$ — спектральная плотность стационарного случайного информационного сигнала; $S_U(\omega)$ — спектральная плотность сигнала шума; $|W_D(j\omega)|^2$ — квадрат амплитудной частотной функции датчика;

$|W_{uc}(j\omega)|^2$ — квадрат амплитудной частотной функции измерительной системы.

Выражения (9), (10) используются для контроля достоверности оценки динами-

ческой погрешности для случая известных спектральных плотностей измеряемого сигнала и шума измерительной системы.

Результаты цифрового моделирования процесса динамического измерения подтверждают эффективность разработанного алгоритма. Так, при гармоническом характере входного сигнала — $U(t) = 1 \cdot \sin(8.5t)$ и сигнала шума — $V(t) = 0.05 \cdot \sin(1200t)$, параметры которых удовлетворяют условиям (7) и (8), оценка динамической погрешности измерения уменьшилась на 59,8% по сравнению с измерением без дополнительной коррекции. При частотных параметрах шумового воздействия, выходящих за границы достоверности оценки динамической погрешности по условию (7) — $V(t) = 0.05 \cdot \sin(100t)$, уменьшение динамической погрешности составило 44,5%. Рассогласование между истинной динамической погрешностью и ее оценкой в начальной и конечной точке поиска не превышает 2%. При моделировании импульсного воздействия, заданного полупериодом синусоиды — $U(t) = 1 \cdot \sin(8.5t)$ и гармоническом шумовом сигнале — $V(t) = 0.05 \cdot \sin(1200t)$, динамическая погрешность измерения уменьшилась на 60,7%.

В третьей главе рассмотрена динамическая модель самонастраивающейся измерительной системы с модальным управлением динамическими параметрами и дополнительным каналом оценки динамической погрешности, учитывающая наличие приведенного сигнала шума на выходе первичного датчика, разработанная на основе градиентного метода построения самонастраивающихся систем. Рассмотрены вопросы обеспечения устойчивости самонастраивающейся измерительной системы. Получен модифицированный алгоритм самонастройки одного динамического параметра самонастраивающейся измерительной системы.

В главе рассмотрен общий случай самонастройки динамических параметров измерительной системы, когда подстройке подвергаются все коэффициенты обратных связей. Алгоритм ориентирован на случай подстройки параметров, когда спектральная плотность шума измерительного канала постоянна и неизвестна или медленно изменяется со скоростью не превышающей скорость протекания переходных процессов в системе.

В основе самонастраивающейся измерительной системы лежит базовая динамическая модель измерительной системы с модальным управлением динамическими характеристиками, представленная на рис. 1. Выход датчика связан с аналогичной полной динамической моделью, охваченной обратными связями с измеряемыми коэффициентами $k_0(t), k_1(t), \dots, k_{n-1}(t)$, которые являются функциями

времени и изменяются независимо друг от друга в соответствии с оценкой динамической погрешности.

При этом критерий настройки параметров специально сформированным сигналом оценки динамической погрешности, являющимся непрерывной функцией времени и зависящей от настраиваемых параметров.

В соответствии с методом градиента, мерой рассогласования движений выходной координаты реальной системы с выходом модели принята функция от сигнала оценки динамической погрешности, в виде

$$I(t) = F\left(e_1^*(t)\right) \left(e_1^*(t)\right)^2, \quad (11)$$

где $I(t)$ — критерий качества самонастройки, который зависит от входного воздействия, начального рассогласования координат модели и системы, а также от настраиваемых динамических параметров $k_i(t)$, $i=\overline{0, n-1}$.

Алгоритм подстройки динамических параметров измерительной системы $k_i(t)$, $i=\overline{0, n-1}$ построен таким образом, чтобы в каждый момент времени изменение коэффициентов обратных связей было направлено на уменьшение величины $I(t)$ как функции $k_i(t)$. Закон изменения настраиваемых параметров имеет вид

$$\frac{dk_i(t)}{dt} = -\lambda \cdot \frac{\partial I(t)}{\partial k_i(t)}, \quad i=\overline{0, n-1}, \quad (12)$$

где $\lambda = \text{const}$ — коэффициент усиления, определяющий скорость самонастройки.

Производные функционала $I(t)$ по настраиваемым параметрам определяются из выражений (11), (12) следующими выражениями:

$$\frac{\partial I(t)}{\partial k_i(t)} = 2e_1^*(t) \cdot \frac{\partial e_1^*(t)}{\partial k_i(t)}, \quad i=\overline{0, n-1}. \quad (13)$$

Сигнал с выхода канала оценки динамической погрешности из рис. 1 можно записать в виде

$$e_1^*(t) = \left[y_D(t) - y_M(t) + k_{n-1}(t)Z_{n-1}(t) + \dots + k_1(t)Z_2(t) + k_0(t)Z_1(t) \right] \cdot \left(\frac{a_0 - k_0(t)}{b_0} \right), \quad (14)$$

где $Z_1(t)$, $Z_2(t)$, ..., $Z_n(t)$ — координаты состояния канала оценки динамической погрешности.

Для построения алгоритма самонастройки динамических параметров был определен вид производных от компонент, входящие в выражение (14):

$$\frac{\partial}{\partial k_i(t)} \frac{y_M(t)}{k_i(t)} = \left[b_0 V_{1i}(t) + b_1 V_{1i}^{(1)}(t) + \dots + b_m V_{1i}^{(m)}(t) \right] \cdot \left(\frac{a_0 - k_0(t)}{b_0} \right), \quad (15)$$

где $V_{1i}(t) = \frac{\partial x_{1M}(t)}{\partial k_i(t)}$ — выходные координаты линейных звеньев, на входе

которых действует сигнал $x_{1M}^{(i)}(t); i=\overline{0, n-1}$,

$$\frac{\partial Z_1^{(n)}(t)}{\partial k_i(t)} = -\frac{\partial y_M(t)}{\partial k_i(t)} + (k_{n-1}(t) - a_{n-1}) q_{1i}^{(n-1)}(t) + \dots + (k_0(t) - a_0) q_{1i}(t) + Z_1^{(i)}(t), \quad (16)$$

где $q_{1i}(t) = \frac{\partial Z_1^{(i)}(t)}{\partial k_i(t)}$ — выходные координаты линейных звеньев при входном сигнале $\left(-\frac{\partial y_M(t)}{\partial k_i(t)} \right); i=\overline{0, n-1}$. Структурная схема, показывающая формирование настраиваемых параметров $k_i(t)$, приведена на рис. 2.

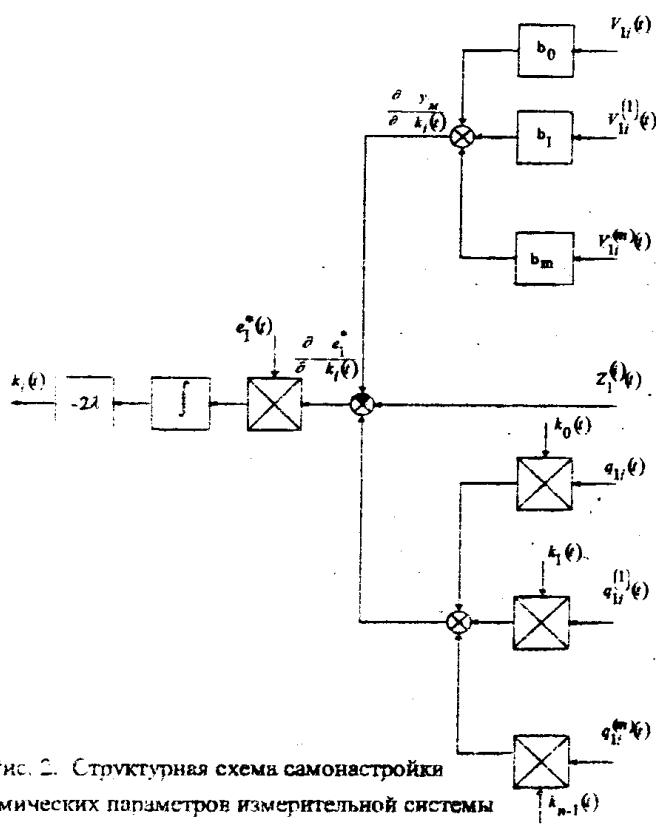


Рис. 2. Структурная схема самонастройки динамических параметров измерительной системы

Измерительная система с самонастраивающимися по динамической погрешности динамическими параметрами структурно представляет собой нелинейную систему управления. Поэтому, для анализа ее устойчивости был применен прямой метод Ляпунова. Линеаризованная модель самонастраивающейся измерительной системы, отличается от устойчивой динамической модели измерительной системы, наличием дополнительных обратных связей, знак которых зависит от параметров невозмущенного движения системы, а величина пропорциональна скорости са-

самонастройки динамических параметров из выражения (12). Изменяя значение скорости самонастройки, можно обеспечить малые приращения возмущенного движения в дополнительных обратных связях системы относительно устойчивой системы, регулируя тем самым устойчивость самонастраивающейся измерительной системы.

В работе предложен модифицированный метод самонастройки динамических параметров измерительной системы на основе адаптации одного динамического параметра. С увеличением порядка дифференциального уравнения описывающего датчик резко возрастает количество и сложность контуров самонастройки динамических параметров. Вместе с тем эффективную настройку измерительной системы можно осуществить подстройкой одного параметра, влияющего на наибольшую постоянную времени — T_{\max} . В этом случае самонастраивающийся параметр $K(t)$ аддитивно связан с коэффициентами характеристического уравнения звена, которые определяют наибольшую постоянную времени измерительной системы. Постоянные времени всех остальных звеньев, составляющих знаменатель передаточной функции датчика, изменяются в η раз одновременно с наибольшей постоянной времени:

$$T'_i = \eta \cdot T_i, \quad T'_j = \eta \cdot T_j, \quad (17)$$

где $T'_i = f_1(K(t))$, $T'_j = f_2(K(t))$.

Вид функций $f_i(K(t))$ определяется количеством звеньев первого и второго порядка в знаменателе передаточной функции датчика.

Алгоритм подстройки динамического параметра измерительной системы $K(t)$ построен в соответствии с градиентным методом по выражениям (11)–(13). Сигнал с выхода канала оценки динамической погрешности имеет вид аналогичный (14) с настраиваемыми коэффициентами $k_{im}(t) = f_{1i}(K(t))$, $i = \overline{0, n-1}$.

Вид производной сигнала из выражения (14) по настраиваемому параметру:

$$\frac{\partial e_1^*(t)}{\partial K(t)} = \frac{\partial e_1(t)}{\partial K(t)} \left(\frac{a_0 - k_{0m}(K,t)}{b_0} \right) - e_1(t) \cdot \frac{1}{b_0} \cdot \frac{\partial k_{0m}(K,t)}{\partial K(t)}. \quad (18)$$

При построении алгоритма самонастройки динамических параметров измерительной системы были последовательно определены и реализованы в виде структурных схем линейных звеньев сигналы изменения координат состояния модели датчика в зависимости от изменения настраиваемого динамического параметра и сигналы изменения координат состояния канала оценки динамической по-

грешности в зависимости от изменения настраиваемого динамического параметра. Эти сигналы вошли в схему формирования самонастраивающегося динамического параметра $K(t)$, которая приведена на рис. 3.

Результаты цифрового моделирования процесса динамического измерения подтвердили эффективность разработанной самонастраивающейся измерительной системы. Так в случае самонастройки всех параметров измерительной системы, построенной на основе датчика второго порядка с постоянной времени $T = 0,01$ и коэффициентом демпфирования $\xi = 0,3$, при входном сигнале — $U(t) = 1 \cdot \sin(10t)$ и сигнале шума — $V(t) = 0,05 \cdot \sin(100t)$, динамическая погрешность измерения уменьшилась на 84,2% по сравнению с измерением без дополнительной коррекции. Использование алгоритма самонастройки одного параметра при обработке модельных гармонических сигналов: входной измеряемый сигнал $U(t) = 1 \cdot \sin(100t)$, сигнал шума $V(t) = 0,05 \cdot \sin(1000t)$, для датчика линейных ускорений, состоящего из двух звеньев первого порядка с постоянными времени $T_1 = 5,7 \cdot 10^{-4}$ с, $T_2 = 3,6 \cdot 10^{-3}$ с, и звена второго порядка с постоянной времени $T_3 = 4,7 \cdot 10^{-3}$ с и коэффициентом демпфирования $\xi = 0,53$ позволило уменьшить динамическую погрешность на 60% по сравнению с измерением без дополнительной коррекции.

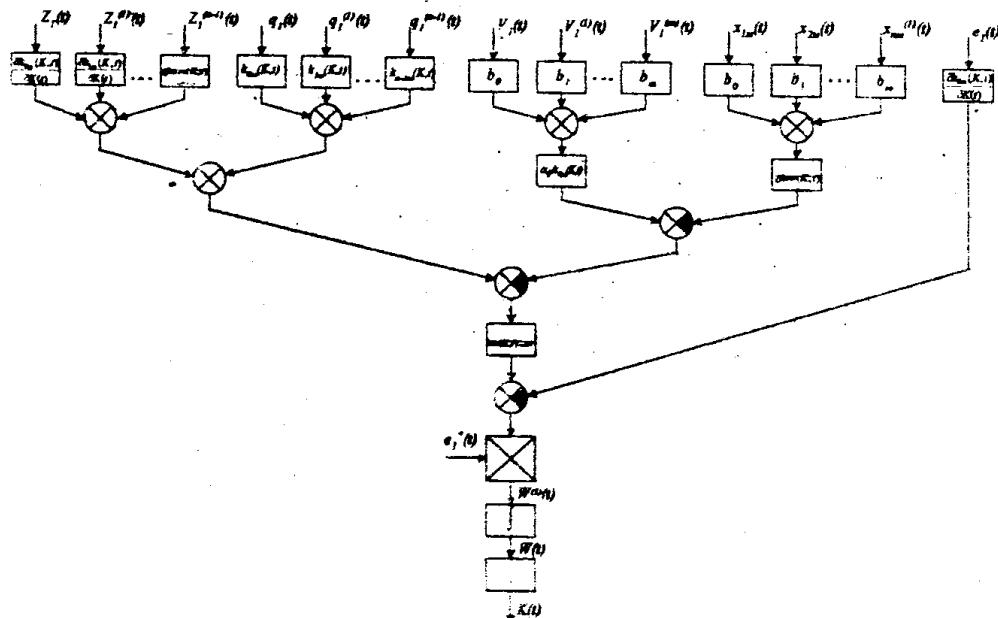


Рис. 3. Структурная схема самонастройки динамического параметра измерительной системы

В четвертой главе рассмотрены вопросы программной реализации разработанных алгоритмов и представлены результаты экспериментального исследования процесса динамического измерения линейных ускорений с использованием датчика типа BT20.

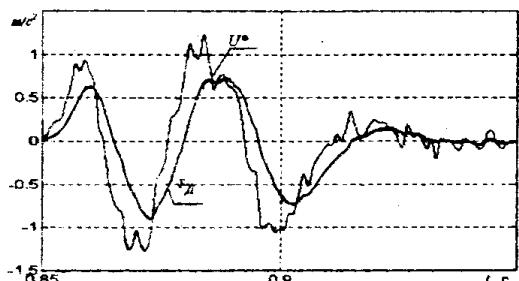


Рис. 4. Результат восстановления сигнала:
 Y_d — выходной сигнал датчика;
 U^* — восстановленный сигнал

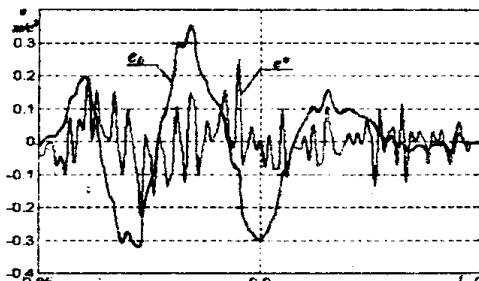


Рис. 5. Оценка динамической погрешности
 e^* — конечное значение погрешности;
 e_0 — начальное значение погрешности

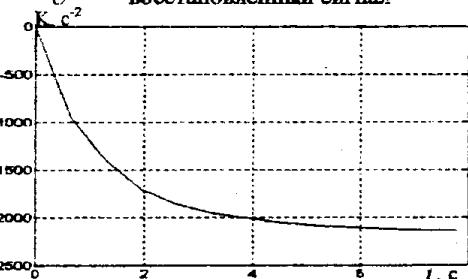


Рис. 6. Процесс подстройки параметра $K(t)$

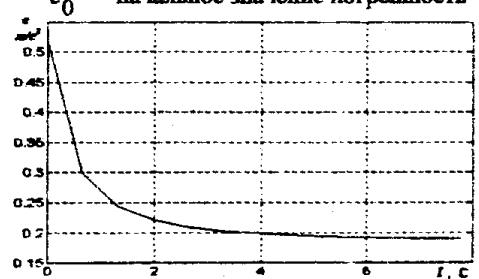


Рис. 7. Оценка динамической погрешности

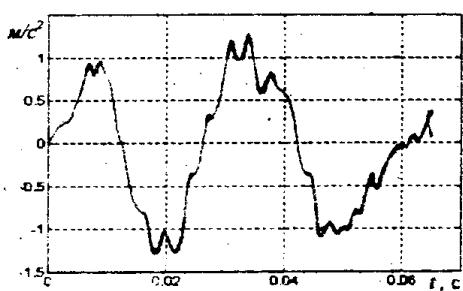


Рис. 8. Выходные сигналы измерительной системы
после восстановления и моделирования

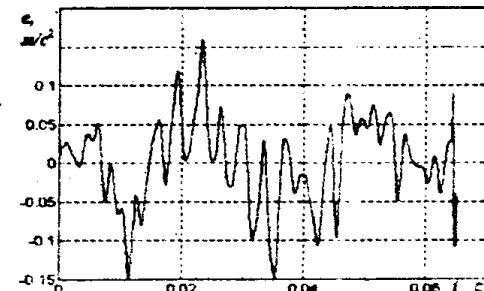


Рис. 9. Оценка истинной погрешности
измерительной системы

Результаты обработки экспериментальных данных с выхода датчика линейных ускорений типа BT20 с использованием разработанного прикладного программного обеспечения, для случая настройки динамического параметра измерительной системы в соответствии с методом прямого поиска, показаны на рис. 4, 5. Оценка динамической погрешности измерения уменьшилась на 42,9% по сравнению с из-

мерением без дополнительной коррекции. Восстановление измеряемого сигнала с использованием алгоритма самонастройки динамического параметра, построенного на основе градиентного метода, показало аналогичные результаты (рис. 6, 7) и позволило снизить динамическую погрешность восстановления входного сигнала датчика на 72,9% по сравнению с измерением без дополнительной коррекции.

Достоверность полученных результатов доказывается тем, что в результате восстановления входного сигнала датчика линейных ускорений с использованием двух различных алгоритмов настройки динамического параметра измерительной системы были получены хорошие совпадения восстановленных сигналов (см. рис. 4, 8). При этом, оптимальные значения настраиваемого параметра, полученные в результате выполнения алгоритмов, отличаются друг от друга на 4,2%. Для оценки истинной погрешности измерительной системы проведено моделирования измерительной системы, при поступлении на ее вход восстановленного сигнала. Результаты моделирования приведены на рис. 8, 9. Разница в пиковых значениях результатов восстановления и моделирования отличается не более чем на $0,16 \text{ м/с}^2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассмотрена задача обработки результатов измерений, выполненных в динамическом режиме, с адаптацией параметров измерительной системы к минимуму оценки динамической погрешности. На основе материалов теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в диссертационной работе, можно сформулировать следующие выводы и результаты:

1. Использование структуры измерительной системы с модальным управлением динамическими характеристиками, включающей в себя полную динамическую модель первичного датчика, на выходе которого присутствует неизвестный приведенный сигнал шума, и дополнительный канал оценки динамической погрешности, позволяет получить алгоритмы настройки параметров измерительной системы, уменьшающие динамическую погрешность измерения.
2. Адекватность динамической погрешности и оценки этой погрешности в алгоритме прямого поиска настраиваемых параметров достигается на основе априорной информации о частотных свойствах измеряемого сигнала, сигнала шума и динамических характеристиках измерительной системы.
3. Реализацию алгоритмов настройки динамических параметров измерительной системы к минимуму оценки динамической погрешности целесообразно проводить на основе прикладных программ обработки данных динамических измерений.

4. Разработан алгоритм настройки динамических параметров измерительной системы произвольного порядка на основе метода прямого поиска, адаптивный к минимуму оценки динамической погрешности. При этом настройка динамических параметров осуществляется по одному обобщенному параметру, с которым связаны все нули и полюса в передаточной функции измерительной системы.
5. Разработан алгоритм самонастройки всех динамических параметров измерительной системы, построенный на основе градиентного метода, позволяющий уменьшить динамическую погрешность измерения путем подстройки всех коэффициентов обратной связи модели датчика к оценке динамической погрешности непосредственно в процессе измерения или на этапе обработки данных. Алгоритм эффективно работает в условиях отсутствия информации о частотных свойствах измеряемого и шумового сигналов.
6. Разработан модифицированный алгоритм самонастройки коэффициентов обратных связей модели датчика на основе адаптации одного параметра, аддитивно связанного с коэффициентами характеристического уравнения звена, которые определяют наибольшую постоянную времени измерительной системы. Изменение остальных постоянных времени системы осуществляется пропорционально изменению наибольшей.
7. Проведенное цифровое моделирование и экспериментальное исследование показало эффективность разработанных алгоритмов. При обработке экспериментальных данных с выхода датчика линейных ускорений типа ВТ20 согласно алгоритму прямого поиска максимальное значение оценки динамической погрешности уменьшилось с $0,35 \text{ м/с}^2$ при нулевом значении настраиваемого параметра до $0,2 \text{ м/с}^2$ при оптимальном значении настраиваемого параметра. Увеличение пиковых значений восстановленного сигнала составило в среднем $0,4 \text{ м/с}^2$. При самонастройке динамического параметра на основе градиентного метода максимальное значение оценки динамической погрешности уменьшилось с $0,71 \text{ м/с}^2$ в начальный момент времени до $0,2 \text{ м/с}^2$ в конце процесса. При этом увеличение пиковых значений восстановленного сигнала составило $0,4 \text{ м/с}^2$.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Юрасова Е.В. Измерительная система динамических параметров с моделью первичного измерительного преобразователя для контроля выходных параметров электроустановок // Электробезопасность. — 1995. — №3. — С.9–16.

2. Шестаков А.Л., Юрасова Е.В. Адаптивный измерительный преобразователь с самонастраивающимися по динамической погрешности динамическими параметрами// Всерос. научн.-техн. конф «Информационные и кибернетические системы управления и их элементы»: Тез докл.— Уфа, 1996.—С.121.
3. Кречетова О.В., Шестаков А.Л., Юрасова Е.В. Измерительная система динамических параметров с моделью первичного измерительного преобразователя // Измерительные преобразователи и информационные технологии: Межвуз. сб. научн. тр.— Уфа, УГАТУ, 1996.—С.142–152.
4. Шестаков А.Л., Юрасова Е.В. Алгоритм коррекции динамической погрешности измерений в условиях случайных шумов измерительной системы // Всерос. научн. конф. «Новые методы, технические средства и технологии получения измерительной информации»: Тез. докл.— Уфа, 1997.—С.149–150.
5. Шестаков А.Л., Юрасова Е.В. Измерительный преобразователь с минимальной динамической погрешностью // Элементы и приборы систем управления: Тем. сб. научн. тр.—Челябинск: ЧГТУ, 1996.—С.15–20.
6. Шестаков А.Л., Юрасова Е.В. Измерительная информационная система, адаптивная к характеристикам шумов первичного измерительного преобразователя, при случайном входном воздействии // Информационные устройства и системы управления: Тем. сб. научн. тр.—Челябинск: ЧГТУ, 1997.—С.22–28.
7. Шестаков А.Л., Юрасова Е.В. Измерительный преобразователь с самонастраивающимися по динамической погрешности динамическими параметрами // II Всерос. научн.-техн. конф. «Методы и средства измерений физических величин»: Тез. докл.— Н. Новгород, НГТУ, 1997.—Ч.1.— С.93.

Составлено