

3(70)/2014

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

Founder

«Information and Control Systems», Ltd.

Editor-in-Chief

M. Sergeev

Dr. Sc. Tech., Professor, St.-Petersburg, Russia

Deputy Editor-in-Chief

E. Krouk

Dr. Sc. Tech., Professor, St.-Petersburg, Russia

Executive secretary

O. Muravtsova

Editorial Council

L. Chubraeva

RAS Corr. Member, Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

V. Kozlov

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

B. Meyer

PhD, Professor, Zurich, Switzerland

A. Ovodenko

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Y. Podoplyokin

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc. Phys.-Math., Novosibirsk, Russia

V. Simakov

Dr. Sc. Tech., Professor, Moscow, Russia

V. Vasilev

RAS Corr. Member, Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

R. Yusupov

RAS Corr. Member, Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Editorial Board

V. Anisimov

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

B. Bezruchko

Dr. Sc. Phys.-Math., Saratov, Russia

N. Blaunstein

Dr. Sc. Phys.-Math., Professor, Beer-Sheva, Israel

A. Dudin

Dr. Sc. Tech., Professor, Minsk, Belarus

V. Khimenko

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

G. Maltsev

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

V. Melekhin

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shalyto

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shepeta

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Smirnov

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Z. Yuldashev

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc. Phys.-Math., Vologda, Russia

Editor: A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** A. Koleshko, M. Chernenko**Layout and composition:** N. Karavaeva**Contact information**

The Editorial and Publishing Center, SUAI

67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

Website: <http://i-us.ru/en>, E-mail: ius.spb@gmail.com

Tel.: +7 - 812 494 70 02

The Journal was registered in the Ministry of Press, Broadcasting and Mass Media of the Russian Federation. Registration Certificate JD № 77-12412 from April, 19, 2002. Re-registration in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR) due to change of the founder: «Information and Control Systems», Ltd., JD № FS77-49181 from March, 30, 2012.

The journal is distributed by subscription. Subscription can be made in the Editorial and publishing center, SUAI as well as in any post office based on «Rospechat» catalogue: № 48060 — annual subscript, № 15385 — semiannual subscript.

© Corporate authors, 2014

INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS**Viktorov D. S., Chislov S. G.** Method of Correction of the Non-Linear Distortions Entered by an Analog Key in Probing Signals 2**Turubanov M. A., Shishlakov V. F., Shyshlakov A. V.** Impulse Control System for Combined Solar and Wind Installation with Superconductor Equipment 8**Zakharova O. L., Kirsanova J. A., Kniga E. V., Zharinov I. O.** Algorithms and Software of Testing Onboard Digital Computer Systems Integrated Modular Avionics 19**SYSTEM AND PROCESS MODELING****Kuchmin A. Yu.** Modeling of Equivalent Stiffness of Adaptive Platforms with the Parallel Structure Executive Mechanism 30**HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES****Balonin N. A., Marley V. E., Sergeev M. B.** New Opportunities of the Mathematical Network for Collaborative Research and Modeling in the Internet 40**Marakhovsky V. B.** CMOS Implementation of the Trainee's Threshold Logical Element. Part I. Design and Training Diagram 47**Kolchin I. V., Filippov S. N.** The Architecture of Bare-Metal Real-Time Microhypervisor and Automated Measurement of Time Response 57**Shoshmina I. V.** A Methodology of Eliciting Context Requirements to Program Logic Control Systems 68**INFORMATION SECURITY****Bezzateev S. V., Voloshina N. V., Sankin P. S.** Safety Analysis Methodology of Complex Systems Taking Into Account the Threats to Information Security 78**Boyko A. A., Djakova A. V.** Method of Developing Test Remote Information-Technical Impacts on Spatially Distributed Systems of Information-Technical Tools 84**INFORMATION CODING AND TRANSMISSION****Cheprukov Yu. V., Socolov M. A.** Correlation Characteristics and Application of Some Binary Codes 93**Alekseev M. O.** On the Detection of Algebraic Manipulations by Means of Multiplication Operation 103**INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS****Allakhverdiyeva N. R.** Development of a Method for Improving the Accuracy of the Measuring Channel 109**INFORMATION INSTRUMENTATION AND EDUCATION****D'yachuk P. P., Loginov D. A., Karabalykov S. A.** Synergetic Approach to Management of Educational Activity in Verbal Problem Environments 118**CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS****Tichonov E. P.** Adaptive Filtering Algorithms Electrocardiogram High Time Resolution Part I. Background Information and Analysis Approach to Solving the Problem 125**CHRONICLES AND INFORMATION****IV International Forum «TELECOM NETWORKS 2.0. Sharing, Engineering, Outsourcing, Development & Metering»** 132**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

134

Submitted for publication 07.04.14. Passed for printing 17.06.14. Format 60×84/8. Offset paper. Phototype SchoolBookC. Offset printing.

Layout original is made at the Editorial and Publishing Center, SUAI.
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia
Printed from slides at the Editorial and Publishing Center, SUAI.
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

Учредитель
ООО «Информационно-управляющие системы»

Главный редактор
М. Б. Сергеев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Зам. главного редактора
Е. А. Крук,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Ответственный секретарь
О. В. Муравцова

Редакционный совет:

Председатель А. А. Оводенко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Н. Васильев,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Н. Козлов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

К. Кристоделу,
д-р. наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США

Б. Мейер,
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария
Ю. Ф. Подоплекин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. В. Симаков,
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Л. Фортуна,
д-р наук, проф., Катания, Италия

А. Л. Фрадков,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Л. И. Чубраева,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ

Ю. И. Шокин,
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ
Р. М. Юсупов,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия:

В. Г. Анисимов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Б. П. Безручко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ

Н. Блаунштейн,
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль

А. Н. Дудин,
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь

А. И. Зейфман,
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ

Г. Н. Мальцев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. Ф. Мелехин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. В. Смирнов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. И. Хименко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. А. Шалыто,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. П. Шепета,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

З. М. Юлдашев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова
Корректор: Т. В. Звертановская
Дизайн: А. Н. Колешко, М. Л. Черненко
Компьютерная верстка: Н. Н. Караваева

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Тел.: (812) 494-70-02, e-mail: ius.spb@gmail.com, сайт: http://i-us.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.
Перерегистрирован в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-49181 от 30 марта 2012 г.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

© Коллектив авторов, 2014

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Викторов Д. С., Числов С. Г. Метод коррекции нелинейных искажений, вносимых аналоговым ключом в зондирующие сигналы 2

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Турубанов М. А., Шишлаков В. Ф., Шишлаков А. В. Импульсная система управления комбинированной солнечно- и ветроэнергетической установкой со сверхпроводниковым оборудованием 8

Захарова О. Л., Кирсанова Ю. А., Книга Е. В., Жаринов И. О. Алгоритмы и программные средства тестирования бортовых цифровых вычислительных систем интегрированной модульной авионики 19

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Кучмин А. Ю. Моделирование эквивалентной жесткости адаптивных платформ с исполнительными механизмами параллельной структуры 30

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Балонин Н. А., Марлей В. Е., Сергеев М. Б. Новые возможности математической сети для коллективных исследований и моделирования в Интернете 40

Мараховский В. Б. КМОП-реализация обучаемого порогового логического элемента. Часть 1: Проектирование и схема обучения 47

Колчин И. В., Филиппов С. Н. Архитектура автономного микро-гипервизора реального времени и автоматизированное измерение его временных характеристик 57

Шошмина И. В. Методика составления контекстных требований к программным системам логического управления 68

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Беззатеев С. В., Волошина Н. В., Санкин П. С. Методика расчета надежности сложных систем, учитывающая угрозы информационной безопасности 78

Бойко А. А., Дьякова А. В. Способ разработки тестовых удаленных информационно-технических воздействий на пространственно распределенные системы информационно-технических средств 84

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Чепруков Ю. В., Соколов М. А. Корреляционные характеристики и применение некоторых бинарных R3-кодов 93

Алексеев М. О. Об обнаружении алгебраических манипуляций с помощью операции умножения 103

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Аллахвердиева Н. Р. Разработка метода повышения точности измерительного канала 109

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЕ

Дьячук П. П., Логинов Д. А., Карабалыков С. А. Синергетический подход к управлению учебной деятельностью в вербальных проблемных средах 118

УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

Тихонов Э. П. Адаптивные алгоритмы фильтрации и фрагментации электрокардиограмм высокого временного разрешения. Часть 1: Исходные сведения и анализ подхода к решению проблемы 125

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

IV Международный Форум «TELECOM NETWORKS 2.0. Sharing, Engineering, Outsourcing, Development & Metering» 132

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

134

Сдано в набор 07.04.14. Подписано в печать 17.06.14. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,0. Уч.-изд. л. 20,1. Тираж 1000 экз. Заказ 258.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП. 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП. 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

УДК 681.32; 621.372.54

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

Н. Р. Аллахвердиева^а, канд. техн. наук, доцент

^аБакинская высшая школа нефти, Баку, Азербайджан

Постановка проблемы: анализ известных методов повышения точности результатов цифровых динамических измерений непрерывных физических величин с позиций корректирующей фильтрации показывает узконаправленность этих методов к подавлению тех или иных составляющих результирующей погрешности (наследственной, т. е. накапливаемой по звеньям измерительной цепи, инструментальной и методической погрешности) измерительного канала. Следовательно, возникает необходимость в разработке универсального метода повышения точности результатов цифровых динамических измерений в измерительном канале. **Результаты:** разработан универсальный метод повышения точности измерительного канала, где под универсальностью понимается его релевантность как к характерам, так и к местам появления и предыстории составляющих погрешности результата измерения. Суть предложенного метода сводится к применению оператора конечной суммы извлечению тренда, т. е. полезной составляющей измерительного сигнала из отфильтрованной смеси. В результате проведенных экспериментов установлена достаточно высокая эффективность разработанного универсального способа повышения точности относительно подавления как случайных, так и систематических составляющих погрешности. **Практическая значимость:** предложенная методика уменьшения буквально всех видов погрешностей может быть применима для динамических измерений всех видов сигналов.

Ключевые слова — погрешность измерения, случайная погрешность, систематическая погрешность, динамические измерения, измерительный канал, фильтрация, усреднение, конечная сумма, тренд.

Введение

Анализ известных методов повышения точности результатов цифровых динамических измерений непрерывных физических величин с позиций корректирующей фильтрации (КФ) показывает узконаправленность этих методов к подавлению тех или иных составляющих результирующей погрешности (наследственной, т. е. накапливаемой по звеньям измерительной цепи, инструментальной и методической погрешности) измерительного канала (ИК) [1–10]. Следовательно, возникает необходимость в разработке универсального метода повышения точности результатов цифровых динамических измерений в ИК.

Рассмотрим характер процесса накопления погрешностей после момента поверки измерительного устройства (ИУ) и выделим два случая:

1) случайный стационарный процесс (без прогрессирующего накопления постоянной составляющей), т. е. не содержащий существенных низкочастотных составляющих;

2) случайный нестационарный процесс, когда среднее значение функции накопления погрешностей во времени имеет монотонно прогрессирующий характер.

В первом случае все погрешности ИУ могут правомерно рассматриваться как единая центрированная случайная величина и характеризоваться единым показателем — вторым центральным моментом (дисперсией) — как средним значением мощности кривой изменения погрешности.

Модель результирующей погрешности представим в виде [11]

$$\varepsilon_{\Sigma}(t) = \varepsilon(t) + \varepsilon_n^0(t) + \bar{\varepsilon}(t).$$

В этой модели составляющие погрешности учтены как $\{\varepsilon_i\}$ и $\{\varepsilon_{ni}^0\}$. Методическую составляющую представим отдельной компонентой $\varepsilon_n^0(t)$. Это сделаем для того, чтобы показать появление методических погрешностей в субтракте аналого-цифрового преобразования (САЦП). В дальнейшем объединим $\varepsilon(t)$ и $\varepsilon_n^0(t)$ в единую составляющую $\varepsilon^0(t)$ результирующей погрешности $\varepsilon_{\Sigma}(t)$. При этом $\varepsilon^0(t)$ представим центрированной случайной стационарной величиной, сопровождающей результаты одиночных нескорректированных цифровых динамических измерений физической величины $x(t)$ в моменты $t = t_i$ времени проведения этих измерений в СППН-САЦП (СППН — субтракт первичного преобразования и нормирования).

Во втором случае накопления погрешностей ИУ в погрешности $\varepsilon_{\Sigma}(t)$ присутствует, кроме случайных изменений, также монотонно прогрессирующая, т. е. низкочастотная составляющая. Она может быть следствием дрейфа нуля или чувствительности измерительной аппаратуры. Естественно, что данная составляющая, имеющая также случайную природу, не может рассматриваться как центрированная.

Учтем эту прогрессирующую составляющую процесса накопления погрешности и включим ее в систематическую погрешность $\bar{\varepsilon}(t)$. Таким

образом, окончательная модель результирующей погрешности имеет вид

$$\varepsilon_{\Sigma}(t) = \varepsilon^0(t) + \bar{\varepsilon}(t).$$

Мощность центрированной случайной стационарной составляющей погрешности, определяемая дисперсией σ_{ε}^2 , не зависит от времени. Мощность же прогрессирующей составляющей монотонно возрастает со временем и поэтому не может быть рассмотрена без учета времени как при метрологических испытаниях ИУ, так и при решении задач повышения точности измерений. Исходя из этого выделим прогрессирующую (дрейфовую) составляющую погрешности из вероятностного рассмотрения и учтем отдельно, например, путем скользящего усреднения.

Скользящее усреднение необходимо при метрологических испытаниях и в случае использования метода усреднения результатов многократных или многоканальных одиночных измерений. Однако из-за отсутствия эффекта подавления прогрессирующей (в том числе и постоянной систематической) составляющей погрешности одиночных измерений метод усреднения используется в основном в первом случае накопления погрешностей.

Таким образом, применительно к подавлению всех составляющих результирующей погрешности ИК, входящих в модель погрешности, задача КФ значительно усложняется. Это диктует необходимость разработки универсальных способов повышения точности результатов измерений.

Разработка метода повышения точности измерительного канала

Под универсальностью метода повышения точности понимается его релевантность как к характеристикам, так и к местам появления и предыстории составляющих погрешности результата измерения.

Борьба с накоплением прогрессирующей составляющей погрешности ведет к необходимости ее локализации и подавления (по мере возможности) в рамках одиночных измерений. В случае же наличия только центрированной стационарной погрешности в результатах одиночных измерений мощным инструментом ее подавления является использование метода усреднения. Однако совмещение этих двух процедур подавления погрешностей в рамках одного общего метода повышения точности весьма проблематично. Необходимо разработать универсальный способ повышения точности результатов цифровых динамических измерений, для чего определим сбалансированный ряд процедур локализации и подавления всех составляющих погрешности:

— локализация и подавление прогрессирующей погрешности в рамках одиночных измерений;

— подавление остаточной прогрессирующей погрешности и центрированной случайной стационарной погрешности на этапе обработки результатов одиночных измерений.

Этап обработки результатов одиночных измерений может быть использован:

- при выполнении косвенных измерений, например в расходомерии;
- при вторичной КФ измерительных данных;
- при статистической обработке полезной и шумовой информации в процессе метрологических испытаний и аттестации ИУ;
- при первичной обработке измерительной информации (линеаризации, масштабировании и т. п.).

Сущность предлагаемого нами метода повышения точности цифровых динамических измерений физической величины $x(t)$ состоит в следующем.

Нескорректированные результаты цифровых одиночных динамических измерений физической величины $x(t)$ представим в виде последовательности формируемых в ходе измерений значений как систему равноотстоящих точек [12]:

$$y_i = f_{\text{ном}}(x_i) + \bar{\varepsilon}_i + \varepsilon_i^0, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Здесь $f_{\text{ном}}(x_i)$ — номинальная функция преобразования СППН; $\bar{\varepsilon}_i(t)$ — прогрессирующая составляющая результирующей погрешности СППН-САЦП; ε_i^0 — центрированная стационарная составляющая результирующей погрешности.

С учетом изменения во времени измеряемую величину представим в виде

$$x(t) = x + \Delta x(t), \quad (2)$$

где x — значение измеряемой величины в начале цикла измерений; $\Delta x(t)$ — изменение измеряемой величины за цикл измерений.

Учитывая (2) в математической модели номинальной функции преобразования, получаем

$$f_{\text{ном}}(x_i) = \sum_{p=1}^n a_{p\text{ном}} (x + i\Delta x)^{p-1}, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Теперь систематические составляющие набора коэффициентов полинома результирующей погрешности представим в виде

$$\overline{\Delta a_p(t)} = \overline{a_p(t)} - a_{p\text{ном}} = \sum_{l=0}^{L-1} c_{pl} t^l, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

С учетом выражения (4) прогрессирующая составляющая результирующей погрешности будет описана полиномом

$$\bar{\varepsilon}(t) = \sum_{p=1}^n \overline{\Delta a_p(t)} [x(t)]^{p-1}. \quad (5)$$

Подставив (2) и (4) в выражение (5), получим

$$\bar{\varepsilon}_i = \sum_{p=1}^n \left[\left(\sum_{l=0}^{L-1} c_{pl} t_i^l \right) (x + i\Delta x)^{p-1} \right], \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

Нетрудно убедиться в том, что с учетом модели (4) случайная ε_i^0 погрешность результата нескорректированного измерения обуславливается центрированными стационарными случайными изменениями коэффициентов полинома (3):

$$\Delta^0 a_p(t) = a_p^0(t) - a_{p \text{ ном}}. \quad (7)$$

Таким образом, полиномы (3) и (6) учитывают изменение измеряемой величины за время цикла измерений в рамках КФ результатов (1) нескорректированных измерений. Следовательно, эти модели релевантны к динамическим измерениям. Помимо этого, модель (6) учитывает систематические изменения набора коэффициентов $a_p(t)$, $p = 1, 2, \dots, n$ реальной функции преобразования СППН-САЦП.

Если полагать, что измерения проводятся в реальном масштабе времени, то необходимо ограничить сверху продолжительность $T_{\text{кор}} = N_{\text{кор}} \cdot T_0$ цикла коррекции за счет либо количества $N_{\text{кор}}$ измерений в цикле, либо шага дискретизации T_0 — времени установления показаний выходного сигнала $y(t)$ СППН. Поэтому в моделях (3) и (6) закон изменения $x(t)$ за цикл коррекции принят линейным: $x_i = x + i\Delta x$ (где i — момент выполнения i -го измерения внутри цикла; $\Delta x = \text{const}$ — приращение измеряемой величины $x(t)$ от $(i - 1)$ -го до i -го такта внутри цикла измерения). В принципе полученные выше модели допускают аппроксимацию изменения $x(t)$ за цикл коррекции нелинейными моделями.

Из выражения (6) можно получить модели динамических погрешностей первого и второго рода.

Динамическая погрешность первого рода обуславливается изменениями параметров реального оператора $A_p[\cdot]$ преобразования, а динамическая погрешность второго рода — изменением измеряемой величины за время измерения.

Модель динамической погрешности первого рода можно получить из (6), приняв $\Delta x = 0$:

$$\varepsilon_{д1i} = \varepsilon_i^0 + \sum_{p=1}^n \left(\sum_{l=0}^{L-1} c_{pl} t_i^l \right) x^{p-1}, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

Для получения модели динамической погрешности второго рода достаточно предположить, что коэффициенты полинома (4) $\{c_{pq}\}$, $q=1,$

$2, \dots, L$ тождественно равны нулю. С учетом этого имеем

$$\varepsilon_{д2i} = \sum_{p=1}^n C_{po} \left[(x + i\Delta x)^{p-1} - x^{p-1} \right], \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

Применив бином Ньютона к моделям (3) и (6), а также учитывая (7), последовательность (1) представим в виде

$$y_i = p_{n-1}(i) + p_{n+L-1}(i) + \varepsilon_i^0, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

Здесь $p_{n-1}(i) \equiv f_{\text{ном}}(x_i)$ и $V_{\text{th}}^p = V_{\text{th}}^n = V_{\text{th}}$ — полиномы дискретного времени i , имеющие порядки $n - 1$ и $n + L - 1$ соответственно.

Предлагаемый универсальный способ КФ сводится к реализации следующих этапов обработки последовательности (10) нескорректированных результатов измерений.

1. Получение конечных разностей порядка $n + L$ в целях подавления полиномов в правой части (10):

$$\{\Delta^{n+L} y_i\} = \{\Delta^{n+L} \varepsilon_i^0\}. \quad (11)$$

2. Восстановление последовательности $\{\varepsilon_i^0\}$ путем применения оператора многократного суммирования $\Sigma^{n+L}[\cdot]$ к последовательности (11):

$$\left\{ \sum^{n+L} \left[\Delta^{n+L} \varepsilon_i^0 \right] \right\} = \{\varepsilon_i^0\}^*. \quad (12)$$

Здесь знак * указывает на то, что в результате получаются оценки последовательности $\{\varepsilon_i^0\}$.

3. Получение конечных разностей порядка n для последовательности (10):

$$\{\Delta^n y_i\} = \{\Delta^n p_{n+L-1}(i)\} + \{\Delta^n \varepsilon_i^0\}. \quad (13)$$

4. Восстановление последовательностей $\{p_{n+L-1}(i)\}$ и $\{\varepsilon_i^0\}$ из (13) с использованием оператора $\Sigma^n[\cdot]$:

$$\left\{ \sum^n \left[\Delta^n y_i \right] \right\} = \left\{ p_{n+L-1}^{(i)} \right\}^* + \{\varepsilon_i^0\}^*. \quad (14)$$

5. Введение корректирующих поправок в последовательность (10):

$$\{y_i^*\} = \{y_i\} - \left\{ \sum^n \left[\Delta^n y_i \right] \right\} \equiv \{f_{\text{ном}}(x_i)\}^*, \quad (15)$$

т. е. подстановка (14) в выражение (15) дает последовательность $\{y_i^*\}$ скорректированных результатов цифровых динамических измерений физической величины x_i по номинальной функции

преобразования. Имея параметры этой функции, получим

$$\{x_i\}^* = F_{\text{НОМ}}^{-1}[\{y_i^*\}]. \quad (16)$$

В принципе, второй этап для целей коррекции погрешностей лишний, но этот этап введен для последующего статистического анализа случайной погрешности ИК. Для анализа прогрессирующей составляющей результирующей погрешности ИК достаточно выполнить преобразование вида

$$\{p_{n+L-1}\}^* = \left\{ \sum^n [\Delta^n y_i] \right\} - \left\{ \sum^{n+1} [\Delta^{n+1} \varepsilon_i^0] \right\}. \quad (17)$$

Очевидно, что к этой последовательности лучше применять анализ во временной области.

Таким образом, предлагаемый способ повышения точности является универсальным и эффективным для комплексного подавления практически всех составляющих погрешностей результатов цифровых динамических измерений $\{x_i\}$ в ИК в ходе выполнения цикла нескорректированных измерений с последующей КФ по описанному выше алгоритму.

Разработка самокорректирующегося измерительного канала

Рассмотрим принцип построения самокорректирующегося ИК, базирующегося на предложенном способе повышения точности результатов измерений.

Согласно модели (10) нескорректированных результатов цифровых измерений в СППН-САЦП, обобщенную блок-схему самокорректирующегося ИК представим в виде, показанном на рис. 1.

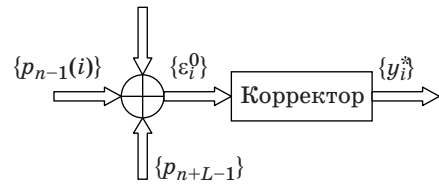
Назначением корректора является выделение из выходной последовательности $\{y_i\}$ полинома $\{p_{n-1}(i)\}$, соответствующего скорректированным результатам (3) цифровых динамических измерений последовательности $\{x_i\}$ физической величины $x(t)$.

Для лучшего понимания задачи синтеза корректора на рис. 2 его входные последовательности показаны отдельно.

В работе [13] применительно к синтезу дискретных систем управления с конечной памятью решена задача синтеза при помощи разностей r -го порядка входного сигнала. При этом полагается, что дискретная система находится под воз-



■ Рис. 1. Обобщенная блок-схема самокорректирующегося ИК



■ Рис. 2. Самокорректирующийся ИК с отдельными входами

действием управляющего $S(iT_0)$ и возмущающего $V(iT_0)$ сигналов, причем управляющий сигнал является суммой двух составляющих:

$$S(iT_0) = g(iT_0) + \varphi(iT_0), \quad (18)$$

где $g(iT_0)$ — медленно меняющаяся функция времени, которую можно представить в виде многочлена от iT_0 с конечным числом членов r , а $\varphi(iT_0)$ — случайная стационарная функция времени со средними значениями, равными нулю.

С целью привлечь к синтезу r -й конечной разности, автор работы [3] регулярную составляющую входного сигнала (18) представляет полиномом степени $r - 1$:

$$g(iT_0) = g(0) + (iT_0)g'(0) + \dots + \frac{(iT_0)^{r-1}}{(r-1)!} g^{(r-1)}(0). \quad (19)$$

С учетом этого сигнала суммарный входной сигнал системы имеет вид

$$y(iT_0) = \varphi(iT_0) + g(iT_0) + V(iT_0). \quad (20)$$

Здесь $V(iT_0)$ — возмущающий сигнал.

Далее от сигнала (20) берется r -я восходящая разность:

$$\Delta^r y(iT_0) = \Delta^r \varphi(iT_0) + \Delta^r V(iT_0). \quad (21)$$

Таким образом, в результате r -кратного применения операции взятия конечной разности в (20) полином полностью исключается, и получаемый сигнал (21) становится стационарным процессом с нулевым средним:

$$\overline{\Delta^r y(iT_0)} = 0. \quad (22)$$

Из формулы (22) видно, что коэффициенты полинома (19) не влияют на характеристики r -го приращения процесса (20). Поэтому эти коэффициенты могут быть известными или неизвестными, неслучайными коэффициентами или случайными величинами реализации другого процесса.

Последнее заключение имеет существенное значение при решении измерительных задач, для

которых всегда объем априорной информации о сигналах и шумах (погрешностях) сильно ограничен.

В нашем случае указанное выше положение применимо к коэффициентам полинома (6) прогрессирующей составляющей погрешности нескорректированного результата измерения.

Поэтому в решаемой нами задаче необходимо иметь представление о порядке полинома (6), что сравнительно легко реализуемо, если знать порядок полинома (3) номинальной функции преобразования и принять модель (2) как изменения измеряемой величины за цикл коррекции.

В работе [13] задача синтеза сводится к лучшему воспроизведению $\Delta^r \varphi(iT_0)$ дискретной системой управления, когда на входе ее присутствует смесь (21) двух случайных стационарных сигналов.

Решаемая нами задача синтеза корректора гораздо сложнее из-за наличия на его входе двух полиномов и стационарной случайной центрированной последовательности (см. рис. 2). Однако идея формирования корректором нового сигнала из входных последовательностей сигналов со стационарными приращениями весьма полезна для решения нами задачи синтеза. В силу наличия двух полиномов на входе корректора указанная выше процедура остационаривания будет использована нами неоднократно.

При разработке алгоритма универсального способа повышения точности было отмечено, что в силу разнообразия характеров компонентов модели (10) комплексное подавление погрешностей нескорректированного измерения может быть достигнуто выполнением ряда этапов коррекции.

Корректирующая фильтрация случайных погрешностей

Исходя из модели, рекомендуемой ГОСТ Р ИСО 5725, оценка случайной погрешности, которая сопровождает каждое измерение, имеет важное значение с точки зрения метрологической аттестации средства измерения. Поэтому разработаем процедуру оценки случайных погрешностей результатов нескорректированных измерений (10). Полученные оценки могут быть использованы далее как для задач метрологической аттестации СППН-САЦП, так и в целях КФ результатов измерений (10) в этом субтракте.

Обозначив $M = n + L$, модель (10) перепишем в виде

$$y_i = P_{n-1}(i) + P_{M-1}(i) + \varepsilon_i^0, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (23)$$

Получим конечную разность порядка M из этой последовательности

$$\Delta^M Y_{M+q} = \Delta^M \varepsilon_{M+q}^0, \quad q = 0, 1, 2, \dots \quad (24)$$

Подвергнув (24) цифровой фильтрации, из последней последовательности получим

$$Z_{M+g} = \sum_{p=0}^M \mu_{p,g} \Delta^M Y_{M+g-p}, \quad g = 0, 1, \dots, M-1. \quad (25)$$

Здесь $\{\mu_{p,g}\}$ — последовательность коэффициентов цифрового фильтра.

Нетрудно показать, что при $\mu_0 = 1$ и

$$\mu_{p,g} = C_{M-1+q+p}^{M-1}, \quad p = 1, 2, \dots, M \quad (26)$$

последовательность (25) будет иметь вид

$$Z_{M+g} = \varepsilon_{M+g}^0 - \sum_{p=1}^M C_{M-1+g+p}^{M-1} \Delta^M \varepsilon_{M-p}^0, \quad g = 0, 1, \dots, (M-1). \quad (27)$$

Здесь C_α^β — сочетание из α по β .

Далее из массива (27) сформируем систему алгебраических уравнений

$$R_{M+g} = \sum_{V=0}^g Z_{M+V} + \sum_{l=0}^{M-1} \Delta^M \varepsilon_l^0 - \sum_{l=0}^{M-1} \varepsilon_l^0, \quad g = 0, 1, \dots, M-1. \quad (28)$$

Подставив (27) в (28), систему алгебраических уравнений представим в виде

$$R_{M+g} = \sum_{l=0}^{M+V} \varepsilon_l^0 - \sum_{V=0}^g \sum_{p=1}^M C_{M-1+V+p}^{M-1} \Delta^M \varepsilon_{M-p}^0 - \sum_{l=0}^{M-1} \varepsilon_l^0, \quad g = 0, 1, \dots, M-1. \quad (29)$$

Поскольку последовательность $\{\varepsilon_i^0\}$ центрированная, с учетом (22) систему алгебраических уравнений окончательно приведем к виду

$$R_{M+g} = - \sum_{V=0}^g \sum_{P=1}^M C_{M-1+V+P}^{M-1} \Delta^M \varepsilon_{M-P}^0 - \sum_{l=0}^{M-1} \varepsilon_l^0, \quad g = 0, 1, \dots, (M-1). \quad (30)$$

Эта система содержит M неизвестных, т. е. $\varepsilon_0^0, \varepsilon_1^0, \dots, \varepsilon_{M-1}^0$, и M уравнений. Поэтому в результате совместного решения этих уравнений получаем оценку случайных погрешностей последовательности нескорректированных измерений y_0, y_1, \dots, y_{M-1} .

Для получения оценок случайных погрешностей последовательности $y_M, y_{M+1}, \dots, y_{2M-1}$ нескорректированных измерений достаточно после-

довательность оценок $\varepsilon_0^0, \varepsilon_1^0, \dots, \varepsilon_{M-1}^0$ подставить в формулу (27), в результате чего имеем

$$\varepsilon_{M+g}^0 = Z_{M+g} + \sum_{P=1}^M C_{M-1+g+P}^{M-1} \Delta^M \varepsilon_{M-P}^0, \quad g = 0, 1, 2, \dots, (M-1). \quad (31)$$

Таким образом, мы сформировали массив оценок $\{\varepsilon_i^0\}$ случайных погрешностей $2M-1$ нескорректированных результатов измерений в СППН-САЦП. Для получения на выходе корректора соответствующей последовательности скорректированных по случайным погрешностям результатов измерений достаточно ввести поправку в (23):

$$\{y_i^*\} = \{y_i\} - \{\varepsilon_i^0\}^*. \quad (32)$$

С учетом (23) из последнего выражения получим

$$y_i^* = P_{n-1}(i) + P_{M-1}(i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, (M-1). \quad (33)$$

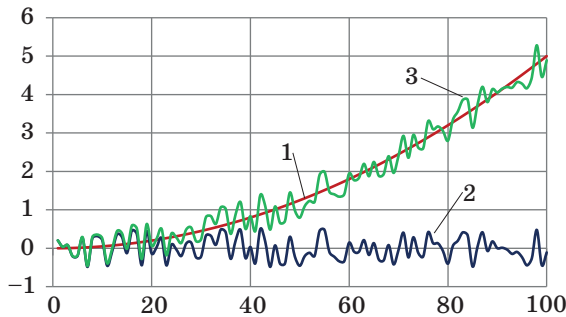
Описанный выше алгоритм КФ случайных погрешностей результатов нескорректированных измерений в СППН-САЦП был реализован с помощью имитационного моделирования с использованием программного пакета MatLab-7.12.

В результате проведенных экспериментов установлена достаточно высокая эффективность разработанного универсального способа повышения точности относительно подавления случайных погрешностей.

В ходе эксперимента в качестве полинома $P_{n-1}(i)$ номинальной функции преобразования (ФП) сгенерирована функция

$$P_{n-1}(i) = b_0 + b_1 i + b_2 i^2, \quad (34)$$

а в качестве случайного шума $\{\varepsilon_i^0\}$ с помощью генератора случайных чисел генерировался цен-



■ **Рис. 3.** Результаты имитационного моделирования: 1 — восстановленный сигнал; 2 — выделенный шум; 3 — измерительный сигнал

трированный шум в 100 точках дискретного времени. КФ осуществлялась с привлечением конечных разностей третьего порядка.

Результаты эксперимента отражены на рис. 3. Они показывают хорошую воспроизводимость номинальной ФП, т. е. тренда. В ходе эксперимента установлено, что дисперсия остаточной случайной погрешности скорректированных измерений составляет 0,02.

Корректирующая фильтрация систематических погрешностей

Теперь рассмотрим корректирующую фильтрацию последовательности $\{P_{M-1}(i)\}$, характеризующую систематическую погрешность скорректированных (относительно случайной погрешности) результатов (33) цифровых измерений величины $x(t)$.

Учитывая условие обнуления полинома $(M-1)$ -й степени конечной разностью M -го порядка

$$\Delta^M P_{M-1}(i) = 0,$$

получаем

$$P_{M-1}(i) = - \sum_{k=1}^M (-1)^k C_M^k P_{M-1}(i-k), \quad i = 0, 1, \dots \quad (35)$$

Заменив второе слагаемое в (33) правой частью равенства (35), имеем

$$y_i^* = P_{n-1}(i) - \sum_{k=1}^M (-1)^k C_M^k P_{M-1}(i-k), \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (36)$$

Получив конечную разность n -го порядка из последовательности (33), напомним

$$\Delta^n y_i^* = \Delta^n P_{M-1}(i). \quad (37)$$

Преобразуя равенство (37), с учетом того, что

$$\Delta^n P_{M-1}(i) = P_{M-1}(i) - \sum_{v=1}^n (-1)^v C_n^v P_{M-1}(i-v),$$

корректирующую поправку представим в виде

$$\Delta^n y_i^* = P_{M-1}(i) - \sum_{v=1}^n (-1)^v C_n^v P_{M-1}(i-v). \quad (38)$$

Введя корректирующую поправку (38) в результаты предварительно скорректированных измерений (33), имеем

$$y_i^{**} = y_i^* - \Delta^n y_i^*. \quad (39)$$

С учетом (38) из выражения (39) получаем последовательность скорректированных результатов динамических измерений:

$$y_i^{**} = P_{n-1}(i) + \sum_{v=1}^n (-1)^v C_n^v P_{M-1}(i-v), \quad i = 0, 1, \dots \quad (40)$$

При сравнении (40) с выражением (36) видим, что эффективность предлагаемого способа корректирующей фильтрации в среднеквадратическом смысле зависит от того, насколько мощность последовательности (35) превышает мощность последовательности

$$P_v(i) = \sum_{v=1}^n (-1)^v C_n^v P_{M-1}(i-v), \quad i = 0, 1, \dots \quad (41)$$

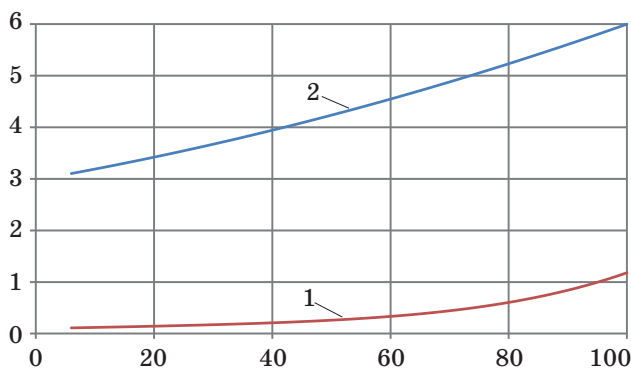
Эффективность корректирующей фильтрации применительно к одиночным измерениям может быть определена разностью

$$\gamma(i) = P_{M-1}(i) - P_v(i), \quad i = 0, 1, \dots \quad (42)$$

Здесь $P_{M-1}(i)$ — систематическая погрешность предварительно скорректированных результатов (33) цифровых динамических измерений; $P_v(i)$ — остаточная систематическая погрешность результатов (40) окончательно скорректированных цифровых динамических измерений.

Другой подход к оценке эффективности подавления прогрессирующей систематической погрешности предложенным способом заключается в следующем.

Поскольку систематическая погрешность предварительного скорректированного результата измерения определяется из (35), окончательно скорректированного выражением (41), определим коэффициент относительного подавления



■ Рис. 4. Исходные данные имитационного моделирования: 1 — систематическая погрешность; 2 — тренд

систематической погрешности в следующем виде:

$$\eta_i = \frac{P_{M-1}(i)}{P_v(i)}. \quad (43)$$

С учетом выражений (35) и (41) выражение для коэффициента подавления принимает вид

$$\eta_i = \frac{\sum_{k=1}^M (-1)^k C_M^k P_{M-1}(i-k)}{\sum_{v=1}^n (-1)^v C_n^v P_{M-1}(i-v)}. \quad (44)$$

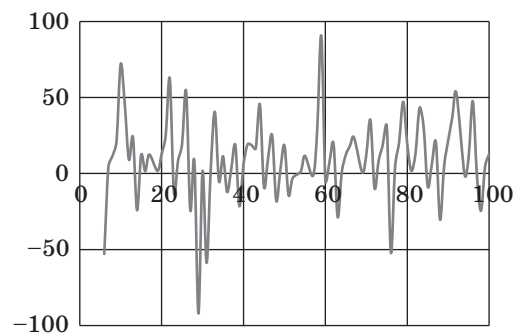
Эффективность предложенной методики подавления систематической погрешности была проверена экспериментально имитационным моделированием в программной среде MatLab-7.12 на примере полиномов второго и пятого порядков следующего вида:

$$P_{n-1}(i) = x^2(i) + 2x(i) + 3;$$

$$P_{M-1}(i) = 0,5x^5(i) + 0,25x^4(i) + 0,01x^3(i) + 0,12x^2(i) + 0,2x(i) + 0,1.$$

Исходные данные для расчетов приведены на рис. 4, а результаты вычислений η для 100 точек дискретного времени — на рис. 5. Как видно из этих рисунков, коэффициент подавления зависит от времени и для большинства точек измерения превышает единицу, достигая в отдельных точках достаточно существенных значений. На основе экспериментальных данных рассчитаны значения коэффициентов подавления для различных отсчетов систематической погрешности (таблица).

Приведенные цифры говорят о значительной эффективности подавления прогрессирующей систематической погрешности (на основе анализа поведения последовательностей $P_{M-1}(i)$ и $P_v(i)$ во времени).



■ Рис. 5. Зависимость коэффициента подавления систематической погрешности от времени

■ Значения коэффициентов подавления систематической погрешности

№ отсчета	Коэффициент подавления	№ отсчета	Коэффициент подавления	№ отсчета	Коэффициент подавления
6,00	-52,92	35,00	11,34	67,00	23,62
7,00	4,05	36,00	-12,18	69,00	0,80
8,00	11,47	37,00	2,64	70,00	12,45
9,00	21,31	38,00	18,70	71,00	35,14
10,00	71,90	39,00	-21,46	72,00	-9,62
11,00	45,95	40,00	5,83	73,00	8,35
12,00	9,19	41,00	19,14	74,00	18,54
13,00	23,79	42,00	18,58	75,00	30,89
14,00	-24,10	43,00	16,47	76,00	-52,14
15,00	12,07	44,00	45,45	77,00	3,65
16,00	1,47	45,00	-8,79	78,00	20,30
17,00	12,49	46,00	9,96	79,00	47,19
19,00	1,73	47,00	25,05	80,00	19,10
20,00	12,71	48,00	-17,91	81,00	1,72
21,00	24,79	49,00	2,15	82,00	12,95
22,00	62,43	50,00	18,53	83,00	43,17
23,00	-12,14	51,00	-14,22	84,00	30,45
24,00	8,19	52,00	-3,11	85,00	-8,60
25,00	19,24	54,00	1,39	86,00	6,18
26,00	54,02	55,00	11,67	87,00	20,42
27,00	-24,04	57,00	-1,38	88,00	-30,37
28,00	7,94	58,00	28,59	89,00	4,81
29,00	-92,08	59,00	90,46	90,00	21,84
30,00	1,45	60,00	-4,41	91,00	37,02
31,00	-58,81	61,00	7,53	92,00	52,77
32,00	2,53	62,00	19,41	94,00	-0,81
33,00	40,59	63,00	-28,67	95,00	11,28
34,00	-5,09	64,00	0,71	96,00	47,54
35,00	11,34	65,00	12,34	97,00	-0,84
		66,00	18,13	98,00	-24,58
				99,00	4,56
				100,00	12,83

Заключение

Результаты компьютерного моделирования показали эффективность предложенной методики, суть которой сводится к применению ко-

нечных разностей для устранения случайных составляющих погрешности, а затем с помощью применения оператора конечной суммы — извлечению тренда, т. е. полезной составляющей измерительного сигнала из отфильтрованной смеси.

Литература

1. Верник С. М. Повышение точности измерений в технике связи. — М.: Радио и связь, 2013. — 202 с.
2. William R. Acton. Improved System of actual Measurement. — Book on Demand Ltd., USA, 2014. — 45 p.
3. Rusty Allred. Digital Filters for Everyone. — Creative Arts & Sciences House, USA, 2013. — 1192 p.
4. Alan S. Morris, Reza Langari. Measurement and Instrumentation. — Elsevier, USA, 2011. — 582 p.
5. Ifan Hughes, Thomas Hase. Measurements and their Uncertainties. — Oxford, UK, 2010. — 134 p.
6. Semyon G. Rabinovich. Measurement Errors and Uncertainties. — Springer, 2010. — 312 p.
7. Philip Bevington, D. Keith Robinson. Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences. — N. Y.: McGraw-Hill Higher Education, 2009. — 314 p.

8. Semyon G. Rabinovich. Evaluating Measurement Accuracy. — Springer, 2009. — 313 p.
9. John R. Taylor. An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements. — USB, California, 1997. — 324 p.
10. Aldert Van Der Ziel. Noise in Measurements. — John Wiley & Sons Inc., 1976. — 240 p.
11. Абдуллаев И. М. Анализ и синтез комплексов оптимального преобразования и цифровой обработки

непрерывных сигналов в ИИС: дис. ... д-ра техн. наук. — Баку, 1992. — 280 с.

12. Абдуллаев И. М., Аллаhverдиева Н. Р. Корректирующая фильтрация в средствах измерения. — Баку: Чашыюглу, 2005. — 181 с.
13. Кузин Л. Т. Расчет и проектирование дискретных систем управления. — М.: Машгиз, 1962. — 683 с.

UDC 681.32; 621.372.54

Development of a Method for Improving the Accuracy of the Measuring Channel

Allakhverdiyeva N. R.^a, PhD, Associate Professor, nailaallahverdiyeva@yahoo.com

^aBaku Higher Oil School, 30, Khodjali St., AZE1025, Baku, Azerbaijan

Purpose: An analysis of the known methods of increasing accuracy of digital dynamic measurement results of continuous physical values from the perspective of correcting filtration shows narrowcasting of these methods towards suppression of certain components of a resulting error (hereditary, i.e. accumulated in links of a measurement chain, instrumental, and methodical error) of a measuring channel. Consequently, there is a need to develop a universal method of increasing accuracy of dynamic measurement results in a digital measuring channel. **Results:** There has been elaborated a universal method of increasing accuracy of a measuring channel where universality implies its relevance to characters, places of appearance and background of error components of measurement results. The essence of the proposed method is use of finite differences to eliminate random error components in a measurement signal and subsequent application of an operator of finite sum for retrieval of a trend, i.e. a useful component of a measurement signal from a filtered mixture. The experiments resulted in defining sufficiently high efficiency of the developed universal method of increasing accuracy with respect to suppression of both random and systematic error components. **Practical relevance:** The proposed method of decreasing various types of errors can be applied for dynamic measurements almost of all types of signals.

Keywords — Measurement Error, Random Error, Regular Error, Systematic Measurement, Dynamic Measurement, Measurement Channel, Filtering, Averaging, Finite Sum, Trend.

References

1. Vernik S. M. *Povyshenie tochnosti izmerenij v tehnike svyazi* [Increasing the Accuracy of Measurements in Communications Technology]. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 2013. 202 p. (In Russian).
2. William R. Acton. *Improved System of Actual Measurement*. Book on Demand Ltd., USA, 2014. 45 p.
3. Rusty Allred. *Digital Filters for Everyone*. Creative Arts & Sciences House, USA, 2013. 1192 p.
4. Alan S. Morris, Reza Langari. *Measurement and Instrumentation*. Elsevier, USA, 2011. 582 p.
5. Ifan Hughes, Thomas Hase. *Measurements and their Uncertainties*. Oxford, UK, 2010. 134 p.
6. Semyon G. Rabinovich. *Measurement Errors and Uncertainties*. Springer, USA, 2010. 312 p.
7. Philip Bevington, D. Keith Robinson. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. New York, McGraw-Hill Higher Education, 2009. 314 p.
8. Semyon G. Rabinovich. Evaluating Measurement Accuracy. Springer, 2009. 313 p.
9. John R. Taylor. *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. University Science Books, California, 1997. 324 p.
10. Aldert Van Der Ziel. *Noise in Measurements*. John Wiley & Sons Inc., 1976. 240 p.
11. Abdullayev I. M. *Analiz i sintez kompleksov optimal'nogo preobrazovaniya i cifrovoj obrabotki nepreryvnyh signalov v IIS*. Dis. dokt. texn. nauk [Analysis and Synthesis of Complexes of Optimal Conversion and Digital Processing of Continuous Signals in IMS. Dr. tech. sci. diss.]. Baku, 1992. 280 p. (In Russian).
12. Abdullayev I. M., Allakhverdiyeva N. R. *Korrektirujushhaja fil'tracija v sredstvax izmerenija* [Correcting Filtration in Measurement Systems]. Baku, Chashioglu Publ., 2005. 181 p. (In Russian).
13. Kuzin L. T. *Raschet i proektirovanie diskretnyh sistem upravlenija* [Calculation and Design of Discrete Control Systems]. Moscow, Mashgiz Publ., 1962. 683 p. (In Russian).