УДК 62–50:519.7/8

Интервальная математика и построение градуировочных характеристик средств измерения

Левин В. И.

Актуальность. *При проектировании различных средств измерения возникает задача построения так называемой градуировочной характеристики измерительного прибора, т.е. количественной зависимости результата измерений от измеряемой величины. Эта характеристика является обратной по отношению к прямой характеристике – зависимости измеряемой величины от результата измерений. Эту задачу решают на основе приближенных данных, получаемых в ходе эксперимента с измерительным прибором. В работе предложен новый метод решения данной задачи, основанный на аппарате интервальной математики.* ***Цель.*** *Целью работы является разработка полностью формализованного метода построения градуировочной характеристики измерительного прибора по приближенным данным, полученным в эксперименте с этим прибором.* ***Метод.*** *Предложенный в статье метод заключается в представлении функции прямого преобразования измерительного прибора в виде линейной интервальной функции, определении ее интервальных параметров (коэффициентов) по данным эксперимента и решении получившейся интервальной зависимости между результатом измерения и измеряемой величиной относительно измеряемой величины. При этом используется методика решения интервальных уравнений.* ***Результат****. Получены общие формулы, определяющие интервальную градуировочную характеристику измерительного прибора на основе данных, полученных в эксперименте с прибором. Выполнен детальный математический анализ этих формул. Установлены общие законы, которым подчиняются прямая и обратная (градуировочная) характеристики любого измерительного прибора, а также зависимость между прямой и обратной характеристиками.* ***Выводы.*** *В статье предложен новый подход к построению градуировочных характеристик измерительных приборов, основанный на использовании интервальной математики, для обработки данных экспериментов с приборами. Этот подход, в отличие от существующих, позволяет строить градуировочные характеристики измерительных приборов и анализировать их чисто аналитически.*

Ключевые слова: *измерительный прибор, градуировочная характеристика, измеряемая величина, результат измерений, интервальная математика.*

Введение

В период II Мировой войны в практику ведения военных действий западных стран (США, Англия, Канада) было введено много новых технологий, такие, как управление огнем зенитной артиллерии, обнаружение воздушных целей с помощью радаров, шифрование и дешифрование информации в системах связи и т.д. Все эти технологии в той или иной степени были связаны с изучением неопределенности, присущей любым военным действиям и любому процессу принятия решений, и использовали соответствующие математические

Библиографическая ссылка на статью:
Левин В. И. Интервальная математика и построение градуировочных характеристик средств измерения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 4. С. 60-70. URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2017-04/03-Levin.pdf

Reference for citation:
Levin V. I. Interval Mathematics and Constructing of Calibration Characteristics of Measuring Tools. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 4, pp. 60-70. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2017-04/03-Levin.pdf (in Russian).

методы, в первую очередь, теорию вероятностей и математическую статистику. После войны эти работы были продолжены во многих странах мира и распространены на гражданские объекты – технические, экономические, социальные. При этом расширилось понимание неопределенности, в которую стали включать не только случайность возможных исходов событий, но также их неединственность или даже неизвестность, дрейф переменных, семантическую неопределенность, неопределенность целей, многокритериальность при принятии решений, неопределенность моделей или структуры изучаемой системы и т.д. Новые технологии изучения неопределенности систем привели к появлению соответствующих новых математических методов этого изучения, таких как теория нечетких множеств, многозначная логика, теория сверхслучайных процессов и т.д. Одним из самых популярных методов стала интервальная математика, изучающая величины, определяемые с точностью до интервалов возможных значений. Конкретные практические задачи, которые приходится решать для систем и процессов, содержащих неопределенность, весьма разнообразны. Здесь и нахождение интервала неопределенности характеристики системы, и решение уравнений с неопределенными коэффициентами, и обработка данных экспериментов, и проверка гипотез по этим данным, и др. Одной из важнейших для практики является задача построения градуировочных характеристик измерительного прибора по данным эксперимента. Именно этой задаче и посвящена настоящая статья.

Обзор литературы

Проблемы количественного изучения систем и процессов, характеризуемых той или иной неопределенностью, возникли одновременно с появлением новых технологий моделирования этих систем (процессов) в период II Мировой войны. Соответствующими задачами на первом этапе применительно к военному делу, с позиции теории вероятностей и теории случайных процессов, занимались Н. Винер [1], А.Н. Колмогоров [2] и их ученики и последователи Ф. Морз, Д. Кимбелл [3], Е.С. Вентцель и др. [4]. Однако широкое развитие подобных исследований применительно к гражданским объектам, работающим в условиях неопределенности, началось в 1950–1960-е годы, с позиций математической статистики и ее специальных направлений – обработка данных и планирование экспериментов [5, 6]. В 1970-1980-е годы появилось более широкое понимание неопределенности, включившее не только случайность, но и неопределенность целей, незнание и неединственность возможных исходов, многокритериальность принятия решений. В связи с этим возникли новые подходы к количественному описанию неопределенности: теория нечетких множеств, неопределенность моделей, принятие решений в многокритериальных задачах [7–9]. А с 1980-х годов начали интенсивно применять подход, основанный на интервальной математике, позволяющий вычислять оценки характеристик неопределенных систем и процессов с гарантированной точностью [10–17]. Этот подход сначала применялся в метрологии для определения интервального значения заданной функции при интервальных значениях аргументов. Затем за рубежом этот подход развили для автоматического учета ошибок округления при числовом решении задач на компьютерах, с выдачей результата не в виде числа, а в виде интервала. Это направление получило название интервальные вычисления. А в СССР (России) этот подход развили для нахождения области возможных значений результата вычисления функции с учетом неточно заданных ее аргументов, а также всей структуры данных и символического задания функции. Это направление получило название интервальный анализ или интервальная математика и рассматривалось как теоретическая основа для решения различных задач с неопределенностью в исходных данных и параметрах модели. Обстоятельный обзор соответствующих задач и результатов см. в [18] (см. также последние работы [19, 20]).

Постановка задачи

Рассмотрим основную задачу проектирования любого измерительного прибора – задачу построения градуировочной характеристики прибора по приближенным данным, полученным в эксперименте. Пусть функция преобразования измерительного прибора имеет вид

$$y = f(x), \qquad (1)$$

где x – измеряемая величина, y – результат измерения, полученного с помощью этого прибора. Функция f в формуле (1) определяет некоторую прямую модель работы измерительного прибора. Задача заключается в том, чтобы по данным указанного эксперимента установить обратную модель работы измерительного прибора

$$x = \varphi(y), \qquad (2)$$

и оценить ее погрешность. Функция φ в модели (2) является обратной по отношению к функции f в модели (1). Она называется градуировочной характеристикой измерительного прибора, а поставленная задача – задачей калибровки.

Задача калибровки может решаться методами математической статистики, соответствующий раздел которой называется теорией калибровки [21]. Однако такой подход связан со значительными трудностями. Эти трудности существенно уменьшаются при использовании методов интервальной математики [18]. При этом обычно применяют графический подход к построению градуировочной характеристики измерительного прибора. Между тем, использование интервальной математики позволяет строить указанную характеристику чисто аналитически, что упрощает процедуру построения и позволяет автоматизировать ее. Настоящая статья посвящена использованию интервальной математики для аналитического построения градуировочных характеристик измерительных приборов.

Решение задачи

Для определенности будем считать измерительный прибор линейным преобразователем. Тогда прямая функция преобразования прибора (1) является линейной функцией вида

$$y = a + bx. \qquad (3)$$

Пусть проведен эксперимент по определению выходных значений y прибора по m его входным значениям x. При этом для каждого замеренного значения

x производится n замеров значения y. В результате получается таблица данных (табл. 1).

Табл. 1

x	x_1	x_2	…	x_m
y_1	y_{11}	y_{21}	…	y_{m1}
…	…	…	…	…
y_n	y_{1n}	y_{2n}	…	y_{mn}

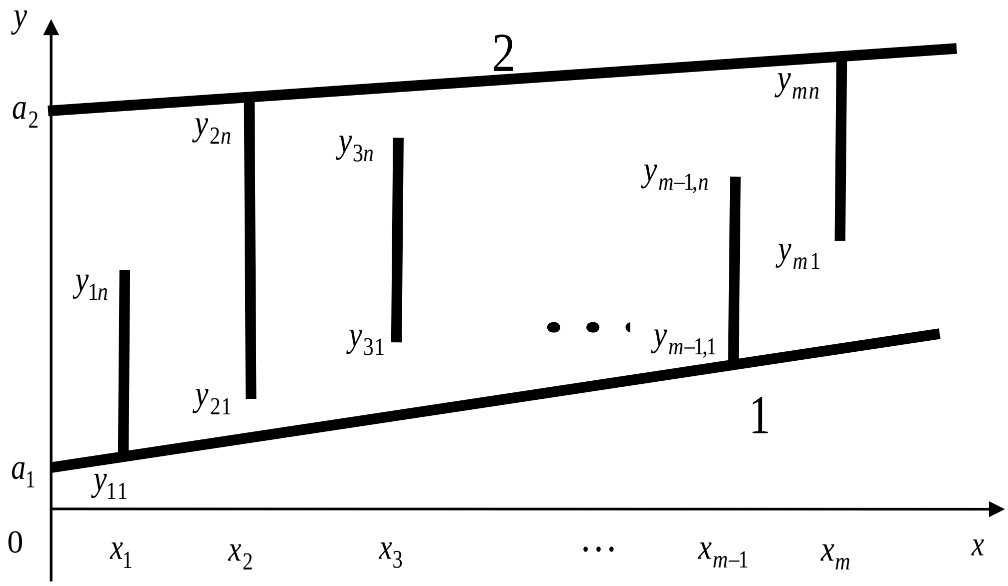

Рис. 1. Прямая интервальная функция – характеристика измерительного прибора (1 – нижняя граничная функция, 2 – верхняя граничная функция).

Соответствующее графическое представление множества данных результатов эксперимента представлено на рис. 1. Используя это представление, можно получить прямую функцию преобразования измерительного прибора в виде соответствующей прямой линейной модели работы этого прибора (3). Для получения данной функции, с учетом ее погрешности, нужно провести на рис.1 две прямые – минимальную верхнюю границу 2 множества данных на рисунке и максимальную нижнюю границу 1 этого множества. Уравнения этих прямых можно записать в виде

$$y_1 = a_1 + b_1 x \text{ (прямая 1); } y_2 = a_2 + b_2 x \text{ (прямая 2).} \tag{4}$$

Теперь нашу функцию представляет коридор между нижней и верхней прямыми 1 и 2. Аналитически эту функцию можно записать в виде интервальной прямой

$$\tilde{y} = \tilde{a} + \tilde{b} x, \tag{5}$$

где $\tilde{a} = [a_1, a_2]$, $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ интервальные параметры, а $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ – интервальная выходная переменная. Для решения задачи нахождения обратной к (5) интервальной функции, поставленной в § 3, нам остается решить уравнение (5) относительно x. Применим для этого интервальный метод [22]. Будем искать неизвестную x в (5), с учетом возможности ее неточных значений, в форме интервала возможных значений

$$x = \tilde{x} = [x_1, x_2]. \tag{6}$$

С учетом (6) уравнение (5) переписывается в виде

$$\tilde{y} = \tilde{a} + \tilde{b}\tilde{x} \text{ или } [y_1, y_2] = [a_1, a_2] + [b_1, b_2] \cdot [x_1, x_2]. \tag{7}$$

Для решения уравнения (7) относительно $\tilde{X}$ используем алгоритм из работы [22].

Шаг 1. Приводим левую и правую части уравнения (7) к явному виду интервала. Учитывая, что согласно рис.1 в (5) $\tilde{a} > 0$, $\tilde{b} > 0$, $\tilde{x} > 0$, с помощью стандартных преобразований интервалов [22] находим: левая часть $\tilde{y} = [y_1, y_2]$, правая часть $\tilde{a} + \tilde{b}\tilde{x} = [a_1, a_2] + [b_1, b_2] \cdot [x_1, x_2] = [a_1, a_2] + [b_1 x_1, b_2 x_2] = = [a_1 + b_1 x_1, a_2 + b_2 x_2]$.

Шаг 2. Представляем все уравнение (7) в явном интервальном виде

$$[y_1, y_2] = [a_1 + b_1 x_1, a_2 + b_2 x_2]. \tag{8}$$

Шаг 3. Переходим от интервального уравнения (8) к системе двух детерминированных уравнений, приравнивая одноименные границы правого и левого интервалов в (8). Получаем

$$\left.\begin{aligned} y_1 &= a_1 + b_1 x_1 \\ y_2 &= a_2 + b_2 x_2 \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

Шаг 4. Решаем систему уравнений (9). Находим корни 1-го и 2-го уравнений.

$$x_1 = y_1 / b_1 - a_1 / b_1 \text{ (прямая 1)}, \ x_2 = y_2 / b_2 - a_2 / b_2 \text{ (прямая 2)}. \tag{10}$$

Пара корней (x_1, x_2), определяемых выражением (10), и есть искомое решение уравнения (7) относительно $\tilde{x} = [x_1, x_2]$. Это решение можно записать в явном виде в форме такой интервальной функции

$$\tilde{x} = [x_1, x_2] = [y_1 / b_1 - a_1 / b_1, y_2 / b_2 - a_2 / b_2]. \tag{11}$$

Нижняя граница этой функции является детерминированной функцией $x_1 = f_1(y_1)$, определяемой 1-м выражением (10), а верхняя граница – детерминированной функцией $x_2 = f_2(y_2)$, определяемой 2-м выражением (10).

Итак, интервальная функция, обратная по отношению к интервальной функции (7), дается выражением (11) и может быть представлена графически на рис. 2. Представление на рис. 2 учитывает, что в исходной, прямой интервальной функции (7) вследствие очевидного неравенства $y_1 < y_2$ параметр $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ удовлетворяет условию

$$a_1 < a_2, \tag{12}$$

а в представляемой обратной интервальной функции (11) вследствие очевидного неравенства $x_1 < x_2$ параметры $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ удовлетворяют условию

$$-a_1 / b_1 < -a_2 / b_2. \tag{13}$$

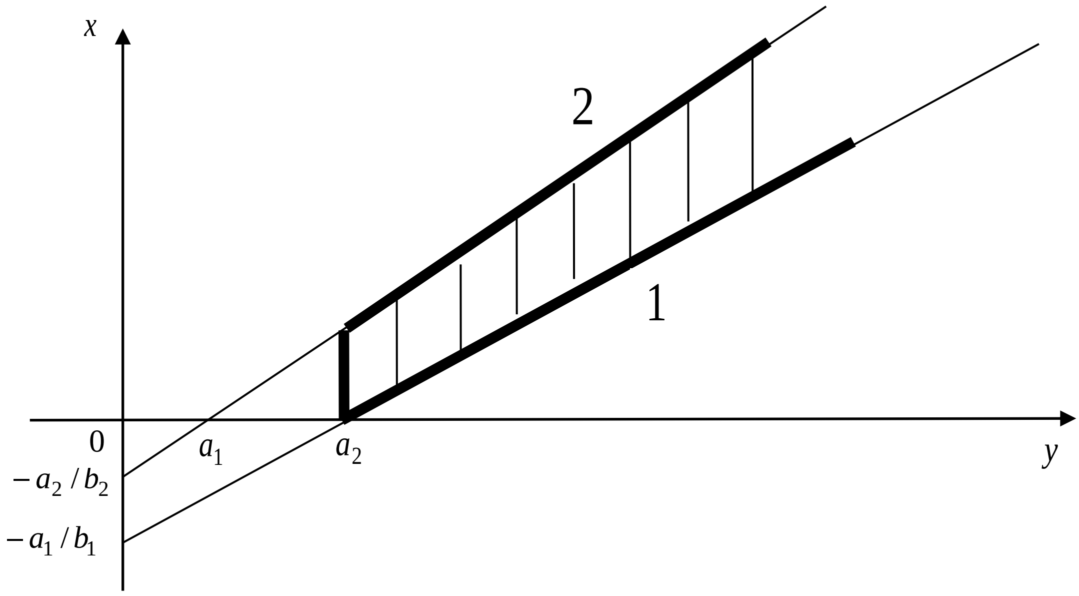

Рис. 2. Обратная интервальная функция – характеристика измерительного прибора (1 – нижняя граничная функция, 2 – верхняя граничная функция).

Таким образом, искомая интервальная функция, обратная по отношению к исходной интервальной функции (7), представляется коридором между нижней и верхней прямыми 1 и 2 (рис. 2), которые описываются уравнениями (10). Эта функция и есть искомая градуировочная характеристика измерительного прибора с определенной по результатам экспериментов функцией прямого преобразования измерительного прибора (7).

Погрешность Δ найденной обратной функции равна ширине коридора между прямыми 1 и 2 на рис. 2, т.е.

$$\Delta = x_2 - x_1 = (y_2/b_2 - a_2/b_2) - (y_1/b_1 - a_1/b_1) = (y_2 - a_2)/b_2 - (y_1 - a_1)/b_1. \quad (14)$$

Анализ решения

Проанализируем полученное выше решение. Целью нашего анализа является установление основных свойств прямой (7) и обратной (11) интервальных функций – характеристик измерительного прибора.

Свойство 1. Верхняя граница коридора, определяющего прямую интервальную функцию – характеристику измерительного прибора (прямая 2), расположена выше нижней границы этого коридора (прямой 1). Это свойство видно непосредственно на рис. 1. Оно следует из соотношения (12) между параметрами a_1 и a_2 прямых 1 и 2, определяющими начальные координаты (при $x = 0$) этих прямых.

Свойство 2. Верхняя граница коридора, определяющего обратную интервальную функцию – характеристику измерительного прибора (прямая 2), расположена выше нижней границы этого коридора (прямой 1). Это свойство видно непосредственно на рис. 2. Оно следует из соотношения (13) между параметрами $-a_1/b_1$ и $-a_2/b_2$ прямых 1 и 2, определяющими начальные (при $y = 0$) координаты этих прямых.

Свойство 3. Верхняя граница коридора, определяющего прямую интервальную функцию – характеристику измерительного прибора (прямая 2), наклонена к оси абсцисс под меньшим углом, чем нижняя граница этого коридора (прямая 1) (см. рис. 1), т.е.

$$b_2 < b_1. \tag{15}$$

Действительно, из неравенства (13) следует цепочка неравенств

$$(-a_1 / b_1 < -a_2 / b_2) \leftrightarrow (a_1 / b_1 > a_2 / b_2) \leftrightarrow (a_1 / a_2 > b_2 / b_1).$$

Но, в силу неравенства (12), $a_1 / a_2 < 1$. Отсюда с помощью последнего неравенства цепочки получаем

$$b_2 / b_1 < 1,$$

что равносильно(15).

Свойство 4. Верхняя граница коридора, определяющего обратную интервальную функцию – характеристику измерительного прибора (прямая 2), наклонена к оси абсцисс под большим углом, чем нижняя граница этого коридора (прямая 1) (см. рис. 2), т.е.

$$1/b_2 > 1/b_1. \tag{16}$$

Неравенство (16) следует непосредственно из неравенства (15).

Свойства 3 и 4 означают, что коридор, определяющий прямую интервальную характеристику измерительного прибора (рис. 1), при движении слева направо сужается, а коридор, определяющий обратную интервальную характеристику измерительного прибора (рис. 2) при таком же движении расширяется.

Обсуждение

Выше было показано, что дальнейшее развитие интервального подхода к обработке данных позволяет применить его к построению градуировочных характеристик средств измерения, осуществляя его более совершенными методами, чем это делалось раньше. А именно, используя аналитический аппарат интервальной математики. При этом появляются новые возможности в изучении свойств измерительных систем, такие как качественный анализ количественных характеристик этих систем, изменение этих характеристик при варьировании параметров элементов измерительных систем и др. Указанные новые возможности в изучении свойств измерительных систем открывают перспективы усовершенствования процессов проектирования этих систем, в частности, их автоматизации. Использование интервального подхода позволяет преодолеть трудности, которые возникают при построении градуировочных характеристик с помощью математической статистики.

Заключение

В настоящей статье сформулирована задача построения градуировочной характеристики измерительного прибора по данным прямого эксперимента, устанавливающего вход-выходное соотношение этого прибора. В отличие от известных подходов к решению данной задачи, основанных на математической статистике или на графоаналитических процедурах, используется чисто аналитический подход, основанный на математическом аппарате интервальной математики. Такой подход обеспечивает заметные преимущества – возможность качественного анализа характеристик измерительного прибора, возможность автоматизации его проектирования и др. В работе построен подробный алгоритм вычисления градуировочной характеристики измерительного прибора по данным экспериментально установленной вход-выходной характеристики этого прибора.

Литература

1. Wiener N. Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series. – N.-Y.: Technology Press and Wiley, 1949. – 180 p.

2. Колмогоров А. Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей // Известия АН СССР. Математика. 1941. № 5. С. 3–14.

3. Methods of Operations Research / by P.M. Morse and G.E. Kimbal. – N.-Y.: J. Wiley, 1951. – 158 p.

4. Вентцель Е. С., Лихтерев Я. М., Мильграм Ю. Г., Худяков И. В. Основы теории боевой эффективности и исследования операций. – М.: ВВИА, 1961. – 524 с.

5. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.

6. Налимов В. В., Чернова Н. А. Теория эксперимента. – М. Наука, 1971. – 320 с.

7. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 176 с.

8. Нариньяни А. С. Недоопределенность в системе представления и обработки знания // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1986. № 5. С. 17–25.

9. Hyvonen E. Constraint Reasoning Based on Interval Arithmetic: the Tolerance Propagation Approach // Artificial Intelligence. 1992. Vol. 58. P. 19.

10. Moore R. E. Interval Analysis. – N.-Y.: Prentice-Hall, 1966. – 230 p.

11. Канторович Л.В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений // Сибирский математический журнал. 1962. Т. 3. № 5. С. 17–25.

12. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. – М. Мир, 1987. – 360 с.

13. Вощинин А. П., Сотиров Г. Р. Оптимизация в условиях неопределенности. – М.: МЭИ, София: Техника, 1989. – 226 с.

14. Куржанский А. Б. Задача идентификации – теория гарантированных оценок // Автоматика и телемеханика. 1991. № 4. С. 75–89.

15. Левин В. И. Дискретная оптимизация в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. 1992. № 7. С. 97–106.

16. Левин В. И. Булево линейное программирование с интервальными коэффициентами // Автоматика и телемеханика. 1994. № 7. С. 111–122.

17. Левин В. И. Интервальное дискретное программирование // Кибернетика и системный анализ. 1994. № 6. С. 92–103.

18. Вощинин А. П. Интервальный анализ данных: развитие и перспективы // Заводская лаборатория. 2002. Т. 68. № 1. С. 118–126.

19. Орлов А. И. Статистика интервальных данных // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 3. С. 61–69.

20. Скибицкий Н. В. Построение прямых и обратных статистических характеристик объектов по интервальным данным // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1. С. 87–98.

21. Семенов Л. А., Сирая Т. Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерения. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 127 с.

22. Левин В. И. Интервальные уравнения и моделирование неопределенных систем // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 101–112.

References

1. Wiener N. *Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series*. N.-Y.: Technology Press and Wiley, 1949. 180 p.

2. Kolmogorov A. N. Interpolirovanie i ekstrapolirovanie stacionarnyh sluchaynyh posledovatelnostey [Interpolation and Extrapolation of Stationary Random Sequences]. *Izvestiya AN SSSR. Matematika*, 1941, no. 5, pp. 3-14 (in Russian).

3. Morse P. M., Kimbal G. E. *Methods of Operations Research*. N.-Y., J. Wiley, 1951. 158 p.

4. Ventcel E. S., Lihterev Ya. M., Milgram Yu. G., Hudyakov I. V. *Osnovy teorii boevoy effektivnosti i issledovaniya operaciy* [Basis of theory of Combat Effectiveness and Operation Research]. Moscow, Air force engineering Academy, 1961. 524 p. (in Russian).

5. Nalimov V. V., Chernova N. A. *Statisticheskie metody planirovaniya ekstremalnyh eksperimentov* [Statistical Methods of Planning of Extremal Experiments]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 340 p. (in Russian).

6. Nalimov V. V., Chernova N. A. *Teoriya eksperimenta* [Theory of Experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 320 p. (in Russian).

7. Zadeh L. A. The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning. *Information Sciences*. 1975. no. 8, 9, pp. 199–249, 301–357; 43–80.

8. Narinjyani A. S. Nedoopredelennostj v sisteme predstavleniya i obrabotki znaniya [Uncertainty in System of Presenting and Transforming of Knowledge]. *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika* [Transactions of Academy of Science of USSR. Technical Cybernetics], 1986, no. 5, pp. 17–25 (in Russian).

9. Hyvonen E. Constraint Reasoning Based on Interval Arithmetic: the Tolerance Propagation Approach. *Artificial Intelligence*, 1992, vol. 58, pp. 19.

10. Moore R. E. *Interval Analysis*. N.-Y.: Prentice-Hall, 1966. 230 p.

11. Kantorovich L. V. *O nekotoryh novyh podhodah k vyhchislitelnym metodam i obrabotke nablyudeniy* [About some new approaches to Computing Methods and Observation Processing]. *Sibirskiy matematicheskiy zhurnal* [Siberian Mathematics Journal], 1962, vol. 3, no. 5, pp. 17–25 (in Russian).

12. Alefeld G., Herzberger J. *Introduction to Interval Computation*. N.Y.: Academic Press, 1983. 352 p.

13. Voschinin A. P., Sotirov G. R. *Optimizaciya v usloviyah neoprede-lennosti* [Optimization in Condition of Uncertainty]. Moscow, Moscow Power Engineering Institute, 1989. 226 p. (in Russian).

14. Kurzhanskii A. B. Identification Problem – Theory of Guaranteed Estimates. *Automation and Remote Control*, 1991, vol. 52, no. 4, part 1, pp. 447–465.

15. Levin V. I. Discrete Optimization under Interval Uncertainty. *Automation and Remote Control*, 1992, Vol. 53, no. 7, pp. 1039–1047.

16. Levin V. I. Boolean Linear Programming with Interval Coefficients. *Automation and Remote Control*, 1994, vol. 55, no. 7, pp. 1019–1028.

17. Levin V. I. Interval Discrete Programming. *Cybernetics and Systems Analysis*, 1994, vol. 30, no. 6, pp. 866–874.

18. Voschinin A. P. Intervalniy analiz dannyh: razvitie i perspektivy [Interval Data Analysis]. *Industrial Laboratory*, 2002, vol. 68, no. 1, pp. 118–126 (in Russian).

19. Orlov A. I. Statistika intervalnyh dannyh [Statistics of Interval Data]. *Industrial Laboratory*, 2015, vol. 81, no. 3, pp. 61–69 (In Russian).

20. Skibickiyj N. V. Postroenie pryamyh i obratnyh statisticheskih harakteristik objektov po intervalnym dannym [Constructing of Straight and Reverse Characteristics of Objects From Interval Data]. *Industrial Laboratory*, 2017, vol. 83, no. 1, pp. 87–98 (in Russian).

21. Semenov L. A., Siraya T. N. *Metody postroeniya graduirovochnyh harakteristik sredstv izmereniya* [Methods of Constructing of Calibration Characteristics of Measuring Devices]. Moscow, Izd-vo standartov, 1986. 127 p. (in Russian).

22. Levin V. I. Interval Equations and Modeling of Indeterminate Systems]. Systems of Control, Communications and Security, 2017, no. 2, pp. 101–112 (in Russian).

Статья поступила 30 января 2018 г.

Информация об авторе

Левин Виталий Ильич – доктор технических наук, профессор, PhD, Full Professor. Заслуженный деятель науки РФ. Пензенский государственный технологический университет. Область научных интересов: логика; математическое моделирование в технике, экономике, социологии, истории; принятие решений; оптимизация; теория автоматов; теория надежности; распознавание; история науки; проблемы образования. E-mail: vilevin@mail.ru

Адрес: 440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11.

Interval Mathematics and Constructing of Calibration Characteristics of Measuring Tools

V. I. Levin

Relevance. *When designing various measuring instruments, the problem arises of constructing the so-called calibration characteristic of a measuring device, i.e. the quantitative dependence of the measurement result on the measured value. This characteristic is inverse to the direct characteristic – the dependence of the measured value on the measurement result. This problem is solved on the basis of approximate data obtained during the experiment with the measuring instrument. A new method for solving this problem is proposed, based on the apparatus of interval mathematics.* ***Goal.*** *The aim of the work is to develop a completely formalized method for constructing the calibration characteristic of a measuring instrument from approximate data obtained in the experiment with this instrument.* ***Method.*** *The method proposed in the article consists in presenting the function of direct conversion of a measuring device in the form of a linear interval function, determining its interval parameters (coefficients) from the experimental data and solving the resulting interval dependence between the measurement result and the measured quantity with respect to the measured value. The method of solving interval equations is used.* ***Result.*** *General formulas are obtained that determine the interval calibration characteristic of the measuring instrument on the basis of the data obtained in the experiment with the instrument. A detailed mathematical analysis of these formulas is performed. General laws are established that obey the direct and inverse (calibration) characteristics of any measuring instrument, as well as the relationship between direct and inverse characteristics.* ***Conclusions.*** *The article proposes a new approach to the construction of calibration characteristics of measuring instruments, based on the use of interval mathematics, for processing data from experiments with instruments. This approach, unlike existing ones, makes it possible to build calibration characteristics of measuring devices and analyze them purely analytically.*

Keywords: *measuring instrument, calibration characteristic, measured value, measurement result, interval mathematics.*

Information about Author

Vitaly Ilich Levin – Doctor of Technical Sciences, Full Professor. Honoured Scientist of Russia. Penza State Technological University. Field of Research: logic; mathematical modeling in technics, economics, sociology, history; decision making, optimization, recognition, automata theory, reliability theory, history of science, problems of education. E-mail: vilevin@mail.ru

Address: Russia, 440039, Penza, pr. Baydukova / Gagarin st., 1a/11.