

деляя из (4) максимальное приращение $\Delta\hat{u}$ как функцию приращения ΔT , находим формулу

$$\Delta\hat{u} / u_m = 0,5 \Delta T a T \omega_b e^{aT} / \left[(1 - e^{aT})^2 \sqrt{1 + \omega_b^2 / a^2} \right],$$

позволяющую оценить погрешность для разных значений a , T , ω_b . Если $a = -10 \text{ с}^{-1}$, $T = 0,01 \text{ с}$, $\omega_b = 6,28 \text{ рад/с}$, $\Delta T = 0,01 T \text{ с}$, то $\Delta\hat{u} / u_m = 0,0026$.

Изложенные в статье результаты анализа показывают, что пошаговая коррекция может служить эффективным методом устранения динамических погрешностей в ИИС при соблюдении следующих условий: наличие достоверной модели динамики системы, тесная корреляция значений ста-

тической погрешности на малом интервале дискретизации процесса, подавление помех, сопровождающих работу высокоразрядных АЦП.

Л и т е р а т у р а

1. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1981.
3. Ратхор Т. С. Цифровые измерения. АЦП/ЦАП. М.: Техносфера, 2006.
4. Айфичер Э. С., Джервис Б. У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. М.: Издат. дом «Вильямс», 2004.

Дата принятия 29.11.2013 г.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.2.531.71

Комплексное решение проблемы повышения точности линейно-угловых измерений фотоэлектрическими методами

В. Н. ЯНУШКИН, Ю. Б. КОЛЯДА

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Россия, e-mail: yura_kolyada@mail.ru

Рассмотрен комплекс взаимосвязанных задач, решение которых позволяет повысить точность измерений при использовании экстремальной счетно-интерполяционной цифровой фотоэлектрической измерительной системы. Приведены примеры реализации таких измерительных систем.

Ключевые слова: комплексное решение, надежность, ремонтпригодность.

The complex of interrelated tasks the solution of which makes possible the further improvement of measurement accuracy based on the use of extreme counting interpolation digital photoelectric measuring system and the examples of practical realization of such systems are considered.

Key words: complex solution, reliability, repairability.

Основной вопрос метрологии — обеспечение высокой точности измерений. Эта комплексная задача имеет три основных направления: разработка высокоточного измерительного оборудования с целью уменьшения погрешностей средств измерения (СИ); научное обеспечение методики выполнения измерений для минимизации методических погрешностей; подготовка высококвалифицированных кадров, обеспечивающих снижение субъективных погрешностей. Самая сложная и многовариантная проблема в этом комплексе — разработка автоматизированных, унифицированных, оптимальных по составу, элементной базе и схемным решениям СИ.

Применение цифровых СИ исключает или упрощает ряд операций, сокращает время измерений. Так, замена меха-

нического базирования математическим устраняет из процесса сложную и затратную по времени операцию базирования и установки нулевого (начального) отсчета, повторяющуюся перед каждым измерением, а также двойные измерения при компенсации или исключении систематических погрешностей, возникающих из-за неточности базирования.

В настоящее время разработано и успешно применяется огромное количество разнотипных измерительных преобразователей и СИ, построенных на основе различных физических принципов. Они имеют отличающиеся метрологические характеристики и используются в различных отраслях производства. Общая тенденция этих приборов — связь их характеристик с ценой: чем качественнее метрологичес-

кие характеристики, тем выше цена. Поэтому для образцовых СИ очень важна их унификация и оптимизация.

Доминирующее положение в области точных линейных и угловых измерений сейчас занимают фотоэлектрические измерительные системы (ИС), использующие в своих конструкциях интерференционные и растровые меры, при сопряжении образующие в пространстве периодические структуры в виде чередования темных и светлых полос. После электронного преобразования этих структур получают треугольный или синусоидальный сигнал — аналог перемещения. В амплитудных ИС — это изменение напряжения сигнала, в фазовых — изменение фазы сигнала. В экстремальных компенсационных ИС в процессе преобразования сигнала используют только характерные точки.

Экстремальные фотоэлектрические ИС позволяют получить дискретность отсчета в нанометровом диапазоне. С 1960 г. в МГТУ им. Н. Э. Баумана проводят работы по проектированию и исследованию таких ИС. Накопленный практический и научный опыт представляет интерес для комплексного решения задач повышения точности измерений, особенно в указанной области измерений линейных и угловых величин. Необходимо рассмотреть вопросы, связанные с автоматизацией, повышением точности, быстродействия, надежности, оптимизацией схемных решений обработки сигнала и представления результатов измерений, оптимизацией элементной базы, удешевления обслуживания, ремонта, подготовки кадров, а также унификацией и стандартизацией в области конструирования ИС.

На рис. 1 представлена обобщенная схема электронного блока (ЭБ) семейства экстремальных компенсационных ИС для линейных и угловых величин, в которых выполняется обработка сигнала. Функциональная схема ЭБ не зависит от типа используемой измерительной головки (ИГ) и вида измеряемой величины [1]. Буквами А, В, С обозначены цепи, соединяющие ИГ и ЭБ. В рассматриваемых ИС используют штриховые, растровые или интерференционные периодические меры.

Конструктивная реализация ИГ и ЭБ существенно не меняется в зависимости от вида ИС, построенных по одному принципу действия. На этом основании можно провести уни-

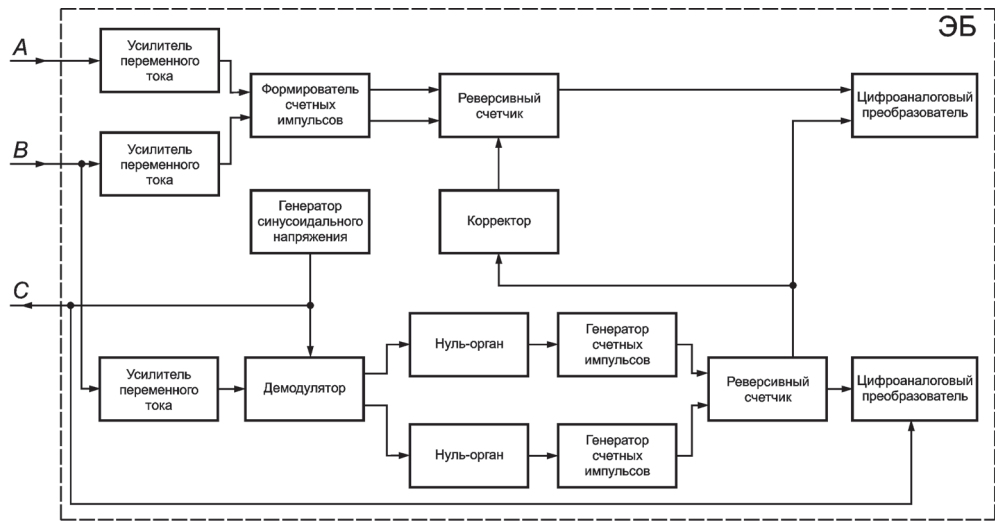


Рис. 1. Блок — схема обработки сигналов

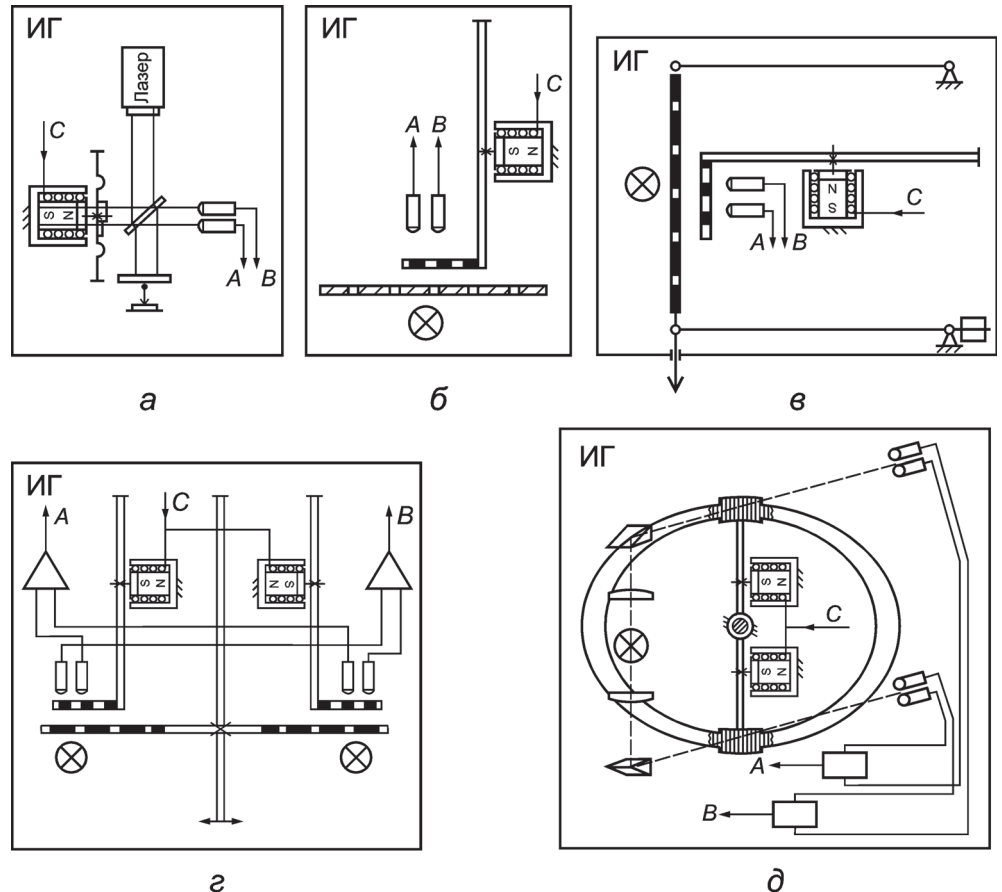


Рис. 2. Функциональные схемы измерительных головок:

а — интерференционной; б — штриховой; в — длиномера; г — двухкомпонентной; д — угловых величин

фикацию и стандартизацию подобных приборов по аналогии с универсальными ИС, применяемыми в настоящее время.

Решение проблемы повышения точности, оптимизации характеристик и унификации при измерении линейных и угловых величин продемонстрируем на примере обобщенной

схемы. На рис. 2, а показана функциональная схема ИГ цифрового интерферометра, выполненного по схеме Майкельсона на базе трубки интерферометра Уверского. В первых модификациях прибора использовали пьезоэлектрические сканирующие компенсационные интерполяторы (СКИ) с интерполяцией на 100 частей. Общий индекс интерполяции при двойном ходе лучей в оптическом канале составляет 200, а дискретность 2,75 нм при $\lambda = 0,55$ мкм [2].

На рис. 2, б показана функциональная схема штриховой головки, применяемой в фотоэлектрическом микроскопе для наведения на штрихи шкалы или измерительного ножа, а также в качестве компонентной головки в координатно-измерительных машинах (КИМ). Достоинство такой головки в том, что в нее закладывается мера, и информация выдается в цифровом виде. [3].

На базе трубки микрокатра было выпущено несколько модификаций прибора, являющихся цифровыми аналогами микрокатра, оптикатра, оптиметра и других ИГ с диапазоном измерения до 0,6 мм, дискретностью отсчета до 0,01 мкм при использовании растров с шагом 20 мкм. В приборах с малой дискретностью возникает необходимость коррекции функции преобразования СКИ [4].

На рис. 2, в показана функциональная схема ИГ вертикального длинмера с малой измерительной силой, предназначенного для измерения хрупких изделий электротехнического приборостроения и исследования характеристик упругих чувствительных элементов в манометрических приборах. В этих ИГ при диапазоне измерения 10 мм использовали параллелограммный механизм с прецизионными подшипниками на осях. В диапазоне измерения 2—5 мм использовали пружинный параллелограмм. В различных модификациях прибор выпускался мелкими сериями. В нем применяли меры с шагом 20—100 мкм, индексом интерполяции 100—10000, дискретностью отсчета 0,005—0,2 мкм, измерительной силой 0,005—0,1 Н.

При больших диапазонах измерений растровая мера составляется стыковкой нескольких коротких мер, так как шаг мер 100 мкм допускает такую возможность. Индекс интерполяции составляет 1000 при дискретности отсчета 0,1 мкм. Быстродействие такого преобразователя не зависит от диапазона измерения и ограничивается быстродействием интерполяционной ступени отсчета (около 20 мс).

На рис. 2, г представлена функциональная схема двухкомпонентной ИГ отклонения КИМ с дифференциальным включением СКИ. В этой головке измерительный двухкоординатный растр закреплен на упругом стержне и может перемещаться по двум взаимно-перпендикулярным осям. В настоящее время ведутся разработки трехкомпонентной головки отклонения с рабочим диапазоном сотни микрометров и высокой точностью, обеспечивающей растровой мерой.

На рис. 2, д показана функциональная схема ИГ цифровой фотоэлектрической системы, предназначенной для измерений угловых величин. Для исключения погрешности от эксцентриситета был разработан СКИ дифференциального типа симметричной конструкции, корректирующий нелинейность функции преобразования. Погрешность такого СКИ составляет $\pm 1,3''$ при индексе интерполяции 1000 и круговом растре 1000 штрихов на окружности. Дискретность отсчета зависит от диаметра лимба [5].

Каждое из рассмотренных устройств содержит источник излучения, измерительное сопряжение, сканатор-интерпо-

лятор, точную и грубую ступени отсчета. Источником излучения служит лампа накаливания, а в более поздних модификациях — светодиод. При пониженном напряжении питания лампа накаливания имеет практически неограниченный срок службы и, как показал опыт, не требует замены. В некоторых случаях можно отказаться от конденсора. В интерференционном фотопреобразователе можно применять лампу накаливания со светофильтром, монохроматический источник света или лазер. Измерительное сопряжение, состоящее из меры (штриховой, растровой или интерференционной) и индикаторного элемента (системы штрихов, индикаторных раstra или зеркала) образует обтюраторное сопряжение (муаровые полосы бесконечной ширины), малочувствительное к угловым перемещениям.

Для осуществления реверсивного счета целых периодов меры на индикаторный элемент СКИ наносят две группы штрихов, сдвинутых на четверть периода, или напыляют ступеньку на индикаторное зеркало интерферометра, что решает проблему согласования отсчетов точной и грубой ступеней. Измерительная система становится двухканальной и независимой от диапазона измерения, определяемого только длиной измерительной меры. При этом в электронном блоке изменяется только разрядность реверсивного счетчика и цифро-аналогового преобразователя.

Для интерполяции периода измерительной меры в точной ступени отсчета используют только один из сигналов счетного канала, энергетические параметры которого вследствие интегрального съема информации с большой площади индикаторного элемента имеют достаточный запас по отношению сигнал—шум. Это обеспечивает высокую точность наведения на экстремум [6]. Точное усреднение случайных погрешностей пространственной шкалы растрового измерительного сопряжения обеспечивают достаточной длиной индикаторного раstra [7].

Особого рассмотрения заслуживает преобразователь с совмещенными функциями сканатора, компенсатора и интерполятора, используемый в фотоэлектрических ИС. Впервые электромагнитный преобразователь такого типа был разработан под названием «обращенный электромагнитный преобразователь, предназначенный для привода индикаторного раstra в колебательное движение с целью сканирования (модулирования) светового потока, а также для отсчета перемещений в долях шага раstra до ближайшего нулевого положения измерительной системы» [8]. Дальнейшие исследования и разработки показали, что наиболее перспективными, с метрологической точки зрения, являются магнитоэлектрические СКИ [9]. В процессе выполнения научно-исследовательских работ различного направления использовали и другие типы СКИ: пьезоэлектрические, электромагнитные, оптоэлектронные [10].

Использование СКИ дает возможность применять компенсационное преобразование при построении интерполятора. Этот метод обеспечивает более высокую точность измерений, так как основан на методе замещения, при котором измеряемую величину (перемещение) сравнивают на входе преобразователя с однородной величиной (перемещением). Таким образом, перемещение измерительной меры сравнивают с перемещением индикаторного элемента. Измерительная система в пределах периода меры построена по замкнутой схеме, погрешность которой определяется погрешностью элементов обратной ветви, т. е. цифро-аналоговым преобразователем и СКИ [11]. Важное свойство

такого интерполятора — его инвариантность к амплитуде и гармоническому составу сигнала, т. е. к дрейфу параметров источника излучения, измерительного сопряжения и элементов прямой ветви тракта преобразования сигнала. В отличие от ИС других типов в экстремальном интерполяторе используют один фотоприемник и нет необходимости согласовывать спектральные характеристики осветителя и нескольких фотоприемников, подбирать и в процессе работы контролировать их по зонной чувствительности, нет требований к их линейности, не нужно контролировать равенство амплитуд сигналов. Требования к параметрам элементов фазовой ИС в многоканальной системе следующие: равенство амплитуд 1,2 %, коэффициент гармоник 0,4 %, погрешность фазирования 0,7 %, постоянная составляющая 0,6 % [12, 13]. В оптическом канале экстремального преобразователя эти характеристики отсутствуют, так как он одноканальный.

Канал интерполятора (точную ступень отсчета) в экстремальной ИС рассматривают как аналого-цифровой преобразователь координата—цифра, работающий внутри периода меры. Контур обратной связи охватывает все элементы, включая измерительное сопряжение, выполняющее функцию сравнивающего звена. Точность интерполятора определяется аддитивной погрешностью, состоящей из погрешности наведения на экстремум освещенности измерительного сопряжения и нестабильности центра колебания индикаторного элемента СКИ.

Экспериментальное определение этих составляющих при помощи двухканальной растрово-интерференционной ИС с дискретностью отсчета в интерференционном канале 0,282 нм ($\lambda = 0,565$ мкм, индекс интерполяции 2000) показывает, что они не превосходят указанной дискретности [14].

Канал счета периодов меры экстремальной счетно-интерполяционной системы (канал грубого отсчета) представляет ИС накопительного типа, работающую на переменном токе без его демодуляции. Дискретность, равная периоду меры, и отсутствие демодулятора в измерительном тракте создают существенный запас по быстродействию и повышают надежность работы данной ИС.

Таким образом, сочетание накопительной системы на переменном токе и экстремальной интерполяционной системы в канале точного отсчета с ее многочисленными преимуществами перед другими интерполяционными системами приводит к комплексному повышению точности и быстродействия ИС.

При помощи программного обеспечения в ЭБ могут быть реализованы коррекция систематической погрешности растровой шкалы, контроль работы интерполятора и его калибровка в автоматическом режиме, установка на нуль или другое значение показаний в начале или конце диапазона измерений.

Все перечисленные возможности повышения точности и быстродействия СИ были применены при создании прецизионных цифровых приборов, изготовленных малыми сериями и используемых в технологических процессах предприятий России. Опыт эксплуатации доказывает их конкурентоспособность и высокую метрологическую надежность по сравнению с аналогичными ИС накопительного типа.

Л и т е р а т у р а

1. **А. с. 142 2002 СССР.** Устройство для измерения перемещений / А. В. Мироненко и др. // Изобретения. 1988. № 33.
2. **Коляда Ю. Б.** Цифровой фотоэлектрический интерферометр для измерения перемещений // Измерительная техника. 2001. № 6 С. 17—18; **Kolyada Yu. B.** Digital Photoelectric Interferometer for Measurement of Displacement // Measurement Techniques. 2001. V. 44. N. 6. P. 579—581.
3. **Мироненко А. В.** Цифровой сканирующий фотоэлектрический микроскоп // Измерительная техника. 1984. № 12. С. 13—15; **Mironenko A. V.** Digital scanning photoelectric compensating microscope // Measurement Techniques. 1984. V. 27. N. 12. P. 1089—1091.
4. **Коляда Ю. Б.** Исследование и разработка способов коррекции погрешностей преобразователей с совмещенными функциями // Измерительная техника. 2001. № 3. С. 29—31; **Kolyada Yu. B.** Investigation and Development of Methods of Correcting the Errors of Converters with Joint Functions // Measurement Techniques. 2001. V. 44. N. 3. P. 265—269.
5. **Коляда Ю. Б.** Цифровой измерительный микроскоп // Измерительная техника. 2005. № 5. С. 20—23; **Kolyada Yu. B.** Digital measuring microscope // Measurement Techniques. 2005. V. 48. N. 5. P. 445—449.
6. **Новицкий П. В.** О тесной и принципиальной взаимосвязи точности, чувствительности, потребления и быстродействия измерительных устройств // Измерительная техника. 1964. № 1; **Novitskii P. V.** The close and fundamental relationship between the precision, sensitivity, consumption and speed of operation of measuring devices // Measurement Techniques. 1964. V. 7. N. 1. P. 7—11.
7. **Колотилин Е. Е.** Об усреднении случайных погрешностей шага штрихов в линейных преобразователях с растровыми решетками // Измерительная техника. 1971. № 4; **Kolotilin E. E.** Averaging random errors of linear transducers' raster gratings // Measurement Techniques. 1971. V. 14. N. 4. P. 537—540.
8. **А. с. 142699 СССР.** Обращенный электромагнитный преобразователь / А. В. Мироненко // Бюл. изобрет. 1961. № 22.
9. **Коляда Ю. Б.** Перспективы применения преобразователей с совмещенными функциями в устройствах точного измерения перемещений // Измерительная техника. 1999. № 1. С. 19—22; **Kolyada Yu. B.** Prospects for using combined-function sensors in precision displacement measurement // Measurement Techniques. 1999. V. 42. N. 1. P. 27—31.
10. **А. с. 573709 СССР.** Устройство для измерения линейных перемещений объектов / А. В. Мироненко и др. // Бюл. изобрет. 1977. № 35.
11. **Соболев В. И.** Структурный анализ погрешностей приборов с компенсационным преобразователем. М.: Приборостроение, 1964.
12. **Преснухин Л. Н.** Муаровые растровые датчики и их применение. М.: Машиностроение, 1969.
13. **Преснухин Л. Н.** Фотоэлектрические преобразователи информации. М.: Машиностроение, 1974.
14. **Янушкин В. Н.** Разработка и исследование сканирующих компенсационных интерполяторов для устройств точного измерения перемещений: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., 1975.

Дата принятия 14.10.2013 г.