

Интеллектуальная обработка данных при автоматизированной калибровке стрелочных средств измерений с применением машинного зрения

А. В. Петров^{1,2}

¹ ООО ИМЦ «Микро», Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

apetrov@spbstu.ru

Аннотация. Современное развитие средств машинного зрения позволяет выполнить автоматизацию процесса калибровки стрелочных средств измерений с применением средств машинного зрения. Качество получаемых результатов находится в прямой зависимости от тех алгоритмов обработки информации, что поступает от используемой фотокамеры. Робастность, надежность и достоверность количественных характеристик результатов калибровки зависят от свойств используемых алгоритмов. В докладе обсуждаются основные операции по обработке информации, выполняемой при интеллектуальной обработке данных при автоматизированной калибровке стрелочных средств измерений с применением средств машинного зрения, новые методы и требования к ним, позволяющие обеспечить соответствие требованиям действующей метрологической нормативной документации.

Ключевые слова: калибровка, индикатор, машинное зрение, погрешность, распознавание, автоматизация, неопределенность

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие цифровых технологий и цифровизация как таковая существенно изменяют современный технический технологический уклад, не обходя стороной и метрологию [1]. Происходящее преобразование парка средств измерений характеризуется расширением номенклатуры и ростом числа типов цифровых средств измерений. Вместе с тем в эксплуатации остается значительное количество средств измерений с аналоговыми (прежде всего стрелочными) индикаторами и измерительными головками – причем в некоторых областях и измерительных задачах тенденции к уменьшению их использования не прослеживаются. Для таких устройств цифровизации подвергаются операции по их метрологическому обеспечению. Как отмечено в [2], полная автоматизация их калибровки требует применения средств машинного (компьютерного) зрения. Метрологический характер решаемой задачи сказывается на особенностях применения данной технологии.

Анализ литературных данных показывает, что алгоритм считывания показаний стрелочного индикатора с помощью машинного зрения включает следующие основные этапы: фиксацию изображения шкалы

индикатора камерой, предварительную математическую обработку (например, в виде гомоморфной фильтрации [3]) для устранения шумов, бликов и отражений, сегментацию изображения (например, пороговую [4]), процедуры бинаризации [5], обнаружение стрелки и штрихов шкалы индикатора.

В научной литературе описан ряд методов обнаружения и выделения стрелки на аналоговом индикаторе средства измерения, среди которых основными являются метод вычитания [6], метод сопоставления с шаблоном [7], метод преобразования Хафа [8], а также метод центральной проекции. Определение текущего положения стрелки преимущественно осуществляется двумя основными способами – угловым методом и методом расстояний [9]. Угловой метод предполагает выполнение расчета значения угла между текущим положением стрелки и нулевой отметкой шкалы, в то время как метод расстояний основан на вычислении дистанции между стрелкой и ближайшим к ней штрихом шкалы. В [10] отмечается, что угловой метод – в силу своей простоты – может быть применен исключительно для индикаторов с равномерной шкалой.

Настоящая работа представляет более совершенную автоматизированную систему калибровки стрелочных индикаторов, основанную на применении средств машинного зрения. В статье представлены результаты анализа модуля машинного зрения на соответствие выбранного алгоритма требованиям, предъявленным к достигаемой точности; методику калибровки прибора для калибровки стрелочных средств измерений (далее компаратора) и модуля машинного зрения; расчеты неопределенности калибровки индикаторов часового типа компаратором.

II. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ИНДИКАТОРА

Индикаторы подавляющего большинства аналоговых средств измерений, предназначенных для линейно-угловых измерений, имеют равномерные шкалы, отличающиеся повышенной точностью по сравнению с шкалами манометров, электроизмерительных приборов и тарированных ключей. В индикаторах часового типа, рычажно-зубчатых головках и аналогичных устройствах длина деления шкалы обычно составляет $(0,9 \pm 1,4)$ мм, а

ширина штрихов и стрелки – $(0,15 \div 0,25)$ мм. Сложившимся в отрасли консенсусом является использование для определения положения стрелки углового метода как достаточно надежного и устойчивого к внешним помехам и искажениям – в частности от вибрации.

При автоматической калибровке изображение шкалы индикатора соответствующего средства измерения фиксируется камерой высокого разрешения, после чего проходит предварительную математическую обработку, включающую фильтрацию, сегментацию и бинаризацию. Далее осуществляется снятие показаний индикатора путем определения положения стрелки, которое состоит из последовательности следующих этапов:

- получения из базы данных диапазона измерений шкалы N_R в мкм;
- поиск на полученном кадре окружности максимального размера, которая будет лежать на границе между шкалой и корпусом индикатора, и определение по ней приблизительных координат центра шкалы (рис. 1);

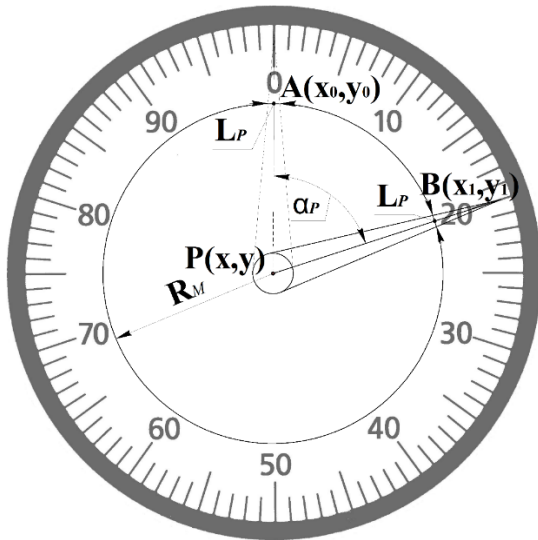


Рис. 1. Определение приблизительных координат центра шкалы в координатной сетке (x, y) кадра

- по координатам центра шкалы выделяется круговая область стрелки и определяются координаты ее центра вращения $P(x,y)$, причем предполагается, что центр шкалы и центр вращения стрелки совпадают;
- относительно центра $P(x,y)$ определяется окружность максимального радиуса R_M , в которой находится минимальное количество точек черного цвета (что соответствует отсутствию надписей и штрихов на шкале)
- по этой окружности производится предварительный поиск положения стрелки и определяется ширина стрелки L_P , шириной стрелки будет являться хорда, проходящая через дугу, которая образована пересечением стрелки и окружности;
- по начальному положению стрелки, соответствующему нулевому штриху шкалы, на

L_P определяется координата середины этой дуги – середины стрелки $A(x_0, y_0)$;

- по координатам положения стрелки $A(x_0, y_0)$ и координатам центра вращения стрелки $P(x,y)$ строится линия шириной в 1 пиксель – эта линия задает нулевое положение стрелки, далее происходит поиск дуги на пересечении стрелки и окружности с радиусом R_M для текущего положения стрелки и находятся координаты середины этой дуги $B(x_1, y_1)$;
- по координатам $B(x_1, y_1)$ и координатам $P(x,y)$ строится линия соответствующая текущему положению стрелки, определяется угол ее наклона – угол наклона стрелки α_P ;
- вычисляются показания индикатора по (1):

$$X = \frac{N_R}{360} \cdot \alpha_P \text{ мкм.} \quad (1)$$

Рассчитаем разрешающую способность метода для определения координаты стрелки. В алгоритме распознавания координаты положения стрелки находятся на окружности с радиусом R_M . Эти координаты могут определяться с точностью до 1 пикселя. Для оценки разрешающей способности (дискретности измерений), непосредственно связанную с точностью, требуется оценить длину окружности $C = 2\pi R_M$, рассчитав ее в пикселях. При разрешении камеры, равном 2592×1944 пикселей, максимальное значение радиуса R_M может составлять $1944/2 = 972$ пикселя, а длина окружности C будет равна соответственно 6104 пикселей. Тогда разрешающая способность составит:

$$\frac{N_R}{C} = \frac{1000 \text{ мкм}}{6104 \text{ пикс}} \approx 0,2 \text{ мкм.}$$

III. МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

В ходе проведения исследования была предложена методика калибровки модуля машинного зрения, которая не требует наличия специального эталона и заключается в следующем [11].

Берется индикатор, устанавливается на компаратор, в ручном режиме стрелка точно устанавливается на контрольные штрихи шкалы по изображению шкалы на дисплее компьютера и с помощью машинного зрения определяются угловые положения стрелки, соответствующие штрихам шкалы. Разность цифровых показаний, получаемых с использованием машинного зрения при помощи камеры, и значений контрольных штрихов по шкале индикатора определяет погрешность считывания с помощью машинного зрения. На рис. 2 данная погрешность отражена на диаграмме 3. Наибольшая погрешность для указанного выше разрешения камеры составляет 2 мкм.

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ КАЛИБРОВКИ С ПОМОЩЬЮ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

Точность калибровки при использовании машинного зрения оценивалась сравнением результатов калибровки индикатора часового типа MarCator 810S фирмы Mahr на компараторе в ручном режиме и в автоматическом на одном обороте в диапазоне $(0 \div 1000)$ мкм с шагом в 100 мкм.

В ручном режиме шкала калибруемого индикатора проецируется на дисплей компьютера, что исключает погрешность от параллакса. Оператор наводит стрелку индикатора на нулевой штрих шкалы и обнуляет показание измерительной системы компаратора и машинного зрения, затем с помощью электронной микроподачи, чувствительность которой не превышает 0,01 мкм, последовательно наводит стрелку на

контрольные штрихи шкалы индикатора и снимает показания компаратора. График погрешности индикатора приведен на рис. 2 на диаграмме 2.

В автоматическом режиме (рис. 2, диаграмма 1) индикатор калибруется в тех же контрольных точках шкалы, что и в ручном режиме, но контрольные точки калибровки задает сервопривод компаратора.

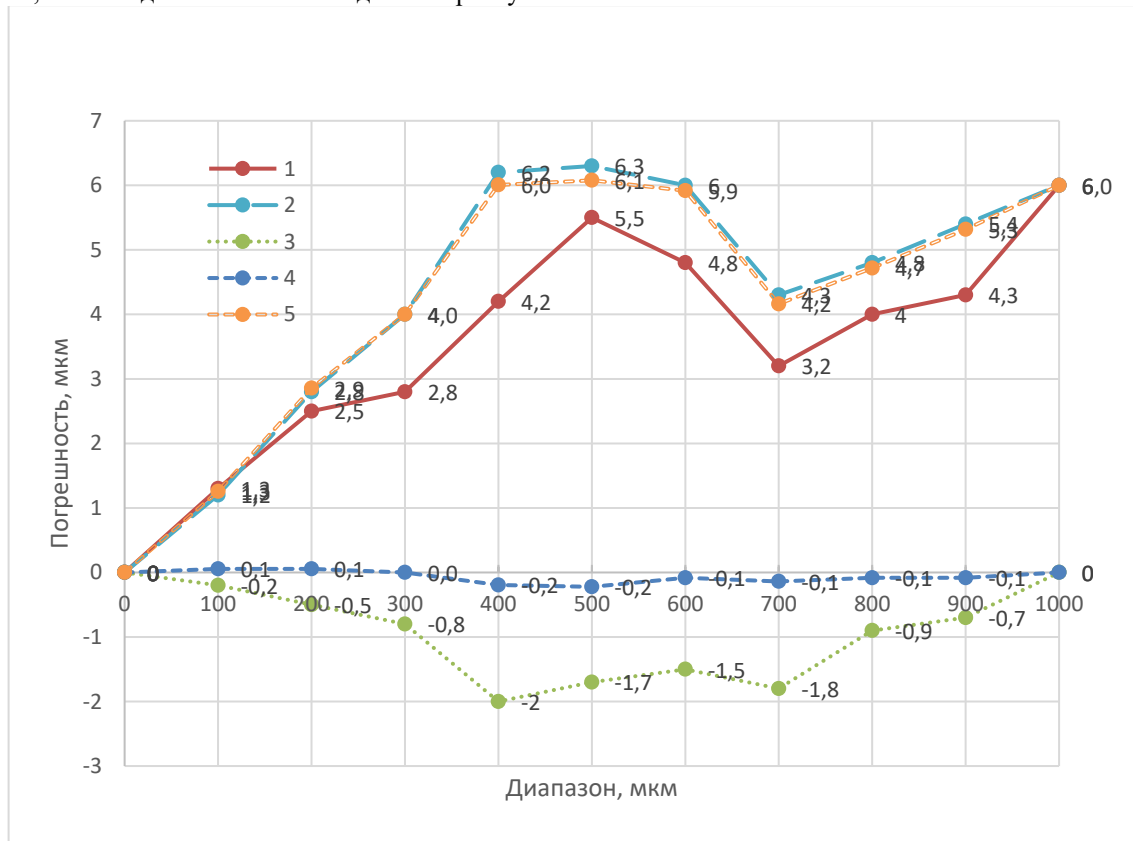


Рис. 2. Диаграммы калибровки компаратора и погрешности машинного зрения. 1 – калибровка в автоматическом режиме, 2 – калибровка в ручном режиме, 3 – погрешность машинного зрения, 4 – погрешность машинного зрения после внесения изменений, 5 – калибровка в автоматическом режиме после внесения изменений

Изучение причин возникающих расхождений и погрешностей показало, что распространённое допущение о совпадении центра шкалы индикатора с осью стрелки не всегда справедливо [12]. Конструкция индикаторов не предусматривает точной юстировки шкалы относительно оси стрелки, а их соосность зависит лишь от производственных допусков. Более того, при считывании показаний ориентируются на положение кончика стрелки относительно делений шкалы, а не на угол её поворота, что хорошо видно на рис. 3.

Исследование изображения индикатора на видеомикроскопе Marvision MM-320 позволило обнаружить несовпадение центра шкалы и оси стрелки в 0,1 мм. С помощью программы «Компас 3D» на изображении индикатора были проведены лучи, построенные из центра вращения стрелки к контрольным штрихам. Выполненное моделирование показало те же результаты, что и погрешность машинного зрения.

На основании проведенных экспериментов программа алгоритма по распознаванию стрелки была откорректирована следующим образом:

- обеспечено выявление координат центра шкалы;
- создано виртуальное представление стрелки как линии, соединяющей центр шкалы и координаты точки на кончике стрелки.

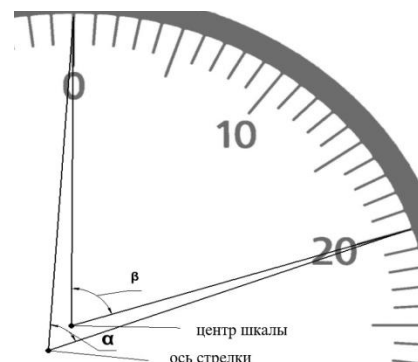


Рис. 3. Несовпадение осей шкалы и стрелки

График калибровки машинного зрения и график калибровки индикатора, представленные на рис. 2 (диаграммы 4 и 5) подтвердили хорошую сходимость результатов калибровки индикатора в визуальном и автоматическом режимах.

V. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ КАЛИБРОВКИ ИНДИКАТОРА

Расчет неопределенности калибровки индикатора с помощью компаратора в автоматическом режиме выполнен на основе [13] для диапазона измерений $(0 \div 1000)$ мкм. В выполненных расчетах основными источниками неопределенностей измерения являлись технические параметры компаратора, а не параметры алгоритма определения положения стрелки, как в [13].

Ниже приведен перечень основных составляющих неопределенности измерений.

1) u_{MPE} – стандартная инструментальная неопределенность компаратора (оценена по типу В).

Согласно техническим требованиям, предел допускаемой погрешности измерений компаратора составил $MPE = \pm 0,3$ мкм. Распределение прямоугольное ($b = 0,6$), $u_{MPE} = 0,3 \cdot 0,6 = 0,18$ мкм

2) u_{MV} – стандартная неопределенность калибровки машинного зрения (оценена по типу В). По результатам исследования наибольшая погрешность считывания показаний при проведении пяти измерений составила 0,2 мкм. Было предположено U-распределение. Соответственно коэффициент распределения b был

равен 0,7 и значение стандартной неопределенности $u_{MV} = 0,2 \cdot 0,7 = 0,14$ мкм.

3) u_{RR} – стандартная неопределенность повторяемости (оценена по типу В).

Наибольшая повторяемость результатов из пяти измерений при калибровке индикатора составила 0,3 мкм. Предположено прямоугольное распределение ($b = 0,6$). Следовательно, $u_{RR} = 0,3 \cdot 0,6 = 0,18$ мкм

4) u_{ZP} – стандартная неопределенность установки стрелки на ноль (оценена по типу А). Размах значений визуальной установки стрелки на нулевой штрих шкалы индикатора по изображению дисплея составила $\pm 0,3$ мкм при 15 измерениях (что положено равным 2 среднеквадратическим отклонениям 2σ). Соответственно получаем $u_{ZP} = 0,3/2 = 0,15$ мкм.

5) u_{DM} – стандартная неопределенность расположения штрихов (оценена по типу В). По информации производителей неравномерность расположения штрихов шкалы индикаторов не должна превышать $\pm 5'$ или $\pm 0,2$ мкм. Было предположено прямоугольное распределение ($b = 0,6$). Соответственно, $u_{DM} = 0,2 \cdot 0,6 = 0,12$ мкм.

Таким, образом, суммарная стандартная неопределенность u_c оказалась равна 0,35 мкм. Соответственно расширенная неопределенность U (при коэффициенте охвата $k = 2$) составила 0,7 мкм.

Перечисленные результаты сведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Источник неопределенности	Тип оценки неопределенности	Тип распределения	Число измерений	Передель изменчивости, a , мкм	Коэффициент распределения b	Неопределенность, u_{xx} , мкм
u_{MPE} – предел допускаемой погрешности	В	прямоугольное		0,3	0,6	0,18
u_{MV} – калибровка машинного зрения	В	U-распределение		0,2	0,7	0,14
u_{RR} – повторяемость	В	прямоугольное	5	0,3	0,6	0,18
u_{ZP} – установка стрелки на ноль	А	Гаусса	15	0,3	2σ	0,15
u_{DM} – расположения штрихов	В	прямоугольное		0,2	0,6	0,12
суммарная стандартная неопределенность, u_c						0,35
расширенная неопределенность ($k=2$), U						0,7

VI. Выводы

Были проведены исследования автоматизированной поверки индикаторов с применением машинного зрения, которые доказали возможность использования углового метода определения положения стрелки, однако выявили необходимость учета несовпадения центра шкалы и оси стрелки у индикаторов.

Экспериментально подтверждены адекватность и достоверность результатов методики калибровки как системы машинного зрения, так и стрелочных индикаторов, обеспечивающие точность измерений.

Выполнено усовершенствование алгоритма распознавания, которое продемонстрировало хорошую сходимость результатов, подтвердив эффективность предложенных технических решений.

Представлен расчет неопределенности калибровки индикаторов с применением машинного зрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Тарасов С.Б., Степанов С.Н., Петров А.В., Степанов С.С., «Цифровизация измерений в металлообработке», Мир измерений. 2020. № 2. С. 14-19.
- [2] Степанов С.С., Петров А.В., Тарасов С.Б., Степанов С., «Автоматизация калибровки приборов для линейных измерений», Наноиндустрия. 2019. Т. 12. № 2 (88). С. 122-127.
- [3] G. Gui-fa, W. Renhuang, and W. Huan, «A pretreatment of image based on reformative homomorphic filtering», Journal of Guangdong University of Technology, vol. 26, no. 3, pp. 57–59, 2009.
- [4] S.-H. Lu, «Study on automatic test system for high precision pointer instrument based on machine vision [Dissertation for the Master Degree in Engineering]», Harbin Institute of Technology, 2013.
- [5] Д.Б. Волегов, Д.В. Юрин, «Считывание показаний стрелочного прибора при помощи web-камеры», // Труды 18-й Международной конференции по компьютерной графике и зрению ГрафиКон'2008, с 242-247.
- [6] Овсянников А.В., «Система автоматического контроля и управления на основе распознавания показаний на средствах визуализации аналоговых приборов», Организационно-техническое управление в межотраслевых комплексах:

- материалы II Международной научно-технической конференции, 20-21 ноября 2007 г., Минск, 2007, С. 312-319.
- [7] Z. Jun, F. Haiping, and K. Ming, «Automatic calibration of dial gauges based on computer vision», *Infrared and Laser Engineering*, vol. 37, pp. 333–336, 2008
- [8] B. Hemming and H. Lehto, «Calculation of uncertainty of measurement in machine vision case: a system for the calibration of dial indicators», in *Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 665–670, Budapest, Hungary, May 2001.
- [9] J. Han, E. Li, B. Tao, and M. Lv, «Reading recognition method of analog measuring instruments based on improved Hough transform», in *Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI '11)*, pp. 337–340, August 2011.
- [10] Патент РФ 2803036 С1/ Петров А.В., Степанов С.С., Корнилов И.Г., Корнилов В.И. Прибор для автоматической поверки индикаторов часового типа и измерительных головок с применением машинного зрения, 05.09.2023
- [11] Petrov A., Tarasov, S., Kornilov, I., Kornilov, V., Stepanov, S., Shabalin, «Study of a Device for Calibrating of Indicating Gages Using Machine Vision» // *Lecture Notes in Networks and Systems*, volume 509, pp.65-75 16 November 2022.
- [12] С.К. Киселев, С.О. Грачева, «Алгоритмические методы обработки изображений шкал стрелочных приборов в системах автоматизации поверки», с. 25-32 // *Вестник УлГТУ* 1/2001.
- [13] ISO 14253-2:2011, Geometrical product specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment — Part 2: Guidance for the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification.