

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС ПОВЕРКИ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

© 2023 г. А. П. Бобрышов^а, *, С. В. Солёный^а, М. В. Сержантова^а,
В. П. Кузьменко^а, М. Э. Создательева^а, Р. В. Рудаков^а

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, 190000 Россия

*E-mail: ap.bobryshov@mail.ru

Поступила в редакцию 20.01.2023 г.

После доработки 13.02.2023 г.

Принята к публикации 13.04.2023 г.

Предметом исследования данной статьи является оценка решения автоматизации инженерной задачи осуществления поверки контрольно-измерительных приборов, путем внедрения в технологический процесс цифровой технологии компьютерного зрения. Оптимизация производственного процесса, цифровой технологией компьютерного зрения, позволяет исключить пагубное влияние отдельного числа погрешностей и, за счет уменьшения времени, затрачиваемого на аттестацию, снижения влияния высокотемпературных процессов на измерительное оборудование. Осуществляется построение оперативной характеристики поверки с учетом субъективных погрешностей, таких как погрешность интерполяции и параллакса, проявляющихся в случае выполнения задачи тестирования человеком. Построенная зависимость сравнивается с результатами графика, на основе показателей поверки при внедрении технологии компьютерного зрения в технологический процесс.

Ключевые слова: компьютерное зрение (КЗ), поверка, инжиниринг, контрольно-измерительный прибор (КИП) погрешность, вероятность, оперативная характеристика поверки, эталон, высокотемпературный процесс, инженерные приложения

DOI: 10.56304/S2079562923010062

ВВЕДЕНИЕ

Инжиниринг представляет собой инженерно-консультационные услуги, содержанием которых, является решение инженерных задач, связанных с созданием или совершенствование технологий, продукции, производственных процессов, систем управления, устранением неопределенностей и т.д. [1]. Стоит выделить, что при этом содержанием услуги является создание нового интеллектуального продукта, а также информации, позволяющих решать конкретную бизнес-задачу с наименьшими затратами ресурсов и с минимальным риском [2]. Сегодня благодаря активному развитию цифровых технологий, совершенствование выполнение и автоматизации многих технологических процессов выходит на совершенно новый уровень. Внедрение таких технологий позволяет повысить эффективность и оптимизировать выполнение различного рода задач в автоматическом режиме [3]. Любая оптимизация имеет собственную оценку определяющую целесообразность проводимой модернизации, в области поверки КИП, такими параметрами являются

погрешность, вероятность определения неисправного устройства годным и наоборот и т.д. Определение степени влияния возникающих ошибок, при проведении процедуры тестирования измерительных устройств, возможно оценить при построении оперативной характеристик для результатов поверки, по которой возможно произвести оценку вероятностей ошибочного признания годными дефектных средств измерения и необнаруженного брака [4].

При автоматизации инженерно-производственной задачи поверки КИП, стоит понимать, что будет полностью нивелирована субъективная погрешность, целью чего и является автоматизация. За счет снижения времени, затрачиваемого на проведение аттестации, ввиду превышающего показателя скорости обработки данных технологией компьютерного зрения, в сравнении с оператором, снижает влияние высокотемпературных процессов, которые возникают при осуществлении аттестации. Но в таком случае, внедряемая технология компьютерного зрения, также будет влиять на

Таблица 1. Результаты поверки КИП

Сигнал источника, В	Показания эталона, В	Показания прибора, В
0	0	0
100	99.8	99.4
150	149.6	149.2
200	199.3	198.9
250	249	248.6

конечную погрешность проводимого тестирования средства измерения.

Задача данной статьи математически оценить степень влияния цифровой технологии технического зрения на проводимую поверку КИП, и определить целесообразность автоматизации производственного процесса такого типа.

СУБЪЕКТИВНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ПРИ ПОВЕРКЕ СТРЕЛОЧНЫХ АНАЛОГОВЫХ КИП

Перед построением оперативной характеристики стоит определить ошибки, вносимые человеком при проведении процедуры поверки. Существует множество различных погрешностей, например методическая, погрешность взаимодействия, динамическая, субъективная, систематическая, инженерного приложения поверки и т.д. [5]. Ошибка человеческого характера различается, как штатное, объяснимое или предсказуемое проявления субъективности. Такая погрешность возникает при поверке аналоговых стрелочных КИП и также носит название погрешности отсчитывания, которая, в свою очередь, состоит из погрешности интерполяции и погрешности параллакса [6]. Данные погрешности, учитывая природу проявления, возникают неизбежно, отличаясь только степенью влияния, которая зависит от субъекта.

Погрешность интерполяции, проявляется всегда, при определении положения стрелки индикации КИП, между двумя соседними делениями шкалы. Данная ошибка имеет значение $\pm 0.2-0.1\%$ величины деления, в пределах которого определяется метрологические показания средства измерения [7]. Цифровые приборы также обладают похожим отклонением, называемым погрешностью квантования, с единственным отличием, в данном случае характер несубъективен.

Погрешность параллакса, как и интерполяции, проявляется всегда, при перпендикулярном взгляде на шкалу измерений. Ошибка зависит от u – расстояния между шкалой и стрелкой измерительного устройства, z – смещения взгляда наблюдателя в плоскости, параллельной шкале и l – рас-

стояния от наблюдателя до стрелки КИП. Определяется погрешность по следующей формуле:

$$\Delta_{\text{пар}} = \frac{yz}{l}.$$

При достаточном опыте поверяющего, данную ошибку возможно свести к $\pm 0.2-0.1\%$ величины деления [7]. При поверке КИП с классом точности в 0.5 для устранения данной погрешности применяется установка в плоскости шкалы зеркала, при этом измерения определяются путем сопоставления стрелки с ее отражением, в таком случае будет нивелировано данное отклонение.

Отдельное стоит выделить особенность работы специализированных инженерных приложений поверочного оборудования. Рабочее программное обеспечение также может вносить собственные показатели отклонения, по причине осуществления расчетов и неравномерного округления измеряемых величин. Погрешность инженерных приложений больше относится к программным, что непосредственно связано с внедряемой технологией компьютерного зрения в процесс поверки. При осуществлении оценки ошибки программного обеспечения необходимо учитывать и показатели погрешностей данных инженерных приложений.

ПОСТРОЕНИЕ ОПЕРАТИВНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРКИ

Оперативная характеристика методики поверки, или контроля погрешности, является зависимостью вероятности признания КИП годным, в результате проведения процедуры поверки, от отклонения погрешности показания прибора по среднему значению к установленному пределу допускаемой погрешности показаний прибора [8]. Объектом исследования являются результаты поверки аналогового стрелочного вольтметра Э8030-М1, класса точности 2.5. Аттестация средства измерения проводилась согласно методикам и требованиям [9]. Результаты поверки КИП представлены в табл. 1.

По результатам поверки средняя погрешность вольтметра была оценена в 0.312%, что соответ-

Таблица 2. Теоретические результаты поверки КИП

Сигнал источника, В	Показания эталона, В	Показания прибора (поверка оператором), В	Показания прибора (поверка технологией компьютерного зрения), В
0	0	0	0
100	99.8	99.4	99.7
150	149.6	149.2	149.5
200	199.3	198.9	199.2
250	249	248.6	249

Таблица 3. Соотношение делений и показаний КИП

Соответствие делений сигналу источника, ед.	Соответствие делений показаниям (поверка оператором), ед.	Соответствие делений показаниям (поверка технологией компьютерного зрения), ед.
1	1	1
7	6.94	6.97
12	11.92	11.95
17	16.89	16.92
22	21.86	21.9

ствуется установленному классу точности в 2.5 и определяет устройство, как годное, при этом показатель ошибки является близким к идеальному значению. Среднее отклонение показаний прибора от эталона составляет 0.4 В, что подтверждает наличие субъективных погрешностей интерполяции и параллакса в суммарном значении 0.4% от цены деления в 10 В, даже в случае снятых оператором высоко качественных показателей устройства. Определение параметров аналогового КИП заключается в оценке угла наклона стрелки индикации [10], как правило такая задача сводится к определению координат точки индикационной стрелки и отметок шкалы измерения. Учитывая исследование [11] и анализ результатов изучения технологии [12], где осуществлялась оценка точности цифровой технологии технического зрения, примем значение погрешности данного метода, учитывая близкие к идеальным значения проводимой поверки, равными 0.35. Поскольку в обоих случаях, при аттестации измерительного устройства, участвует специализированное инженерное приложение, оценку его влияния на результаты поверки не изменится. Уже сейчас можно сказать, в случае исключения субъективной погрешности из результатов измерения, поверяемого КИП, и отражении ошибки компьютерного зрения, показатели неточности будут значительно ниже. Для наиболее качественной оценки произведем построение оперативной характеристики поверки. Составим теоретические данные результатов изме-

рения, при использовании технологии компьютерного зрения, результаты отражены в табл. 2.

Для начала необходимо определить среднюю оценку значений измеряемой величины в делениях отсчетного устройства, проведем анализ измерительного устройства и определим число делений, соответствующих каждому измерению. Поверяемый вольтметр, имеет общее число делений 22, составим таблицу соответствия делений измеряемой величине.

Оценка среднего значения измеряемой величины в делениях определяется по формуле:

$$a_2 = \frac{\sum_{i=1}^n a1_i}{n},$$

где $a1_i$ — результаты измерений в единицах делений КИП; n — количество проводимых измерений.

Стоит отметить, что исследуемый вольтметр имеет неравномерную шкалу, поэтому цена второго по счету деления, составляет 50 В, в то время как величина последующих равны 10 В. Поскольку, после нуля, следующим сигналом источника было 100 В, для нашей теоретической оценки примем значение c — цена деление отсчетного устройства равным 10 В. В таком случае определим оценку среднего значения величины в вольтах по формуле:

$$a_{2M} = a_2 c,$$

Определим результат отклонения наблюдения измеряемой величины от среднего значения, возведем в квадрат и произведем оценку дисперсии одного наблюдения.

$$\Delta l^2 = (a l_i - a_2)^2,$$

$$D_{a l_{\text{ш}}} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} \Delta l^2.$$

Произведем оценку дисперсии среднего значения наблюдений.

$$D_{a_2} = \frac{D_{a l_{\text{ш}}}}{n}.$$

Среднее квадратичное отклонение для среднего значения измеряемой величины с учетом принятой цены деления.

$$S_{a_2} = \sqrt{D_{a_2} c}.$$

Произведем оценку погрешности показаний измерений, где a_0 — значение меры по аттестату и переведем данный показатель в процентное соотношение от значения меры по аттестату.

$$\Delta 2 = a_{2M} - a_0,$$

$$\Delta 2\% = \left| \frac{\Delta 2 \cdot 100}{a_0} \right|.$$

Среднее квадратичное отклонение для погрешности показаний вольтметра.

$$S_{\Delta 2} = \sqrt{S_{a_2}^2 + S_{a_0}^2}.$$

Учитывая класс точности поверяемого вольтметра в 2.5 и сравнивая расчетные соотношения средне квадратического отклонения можно с уверенностью говорить о принятии поверяемого КИП годным (итоговая таблица всех расчетных соотношения будет приведена далее).

Для оценки качества проводимой аттестации измерительного устройства произведем вычисление вероятности признания годным и вероятность признания браком тестируемого устройства. Для этого выразим среднее квадратичное отклонение погрешности в процентах и произведем оценку к пределу допускаемой погрешности.

$$S_{\% \Delta 2} = \frac{S_{\Delta 2} \cdot 100}{a_0}, \quad S = \frac{S_{\% \Delta 2}}{\Delta_{\text{пр}}}.$$

Произведем вычисление числителей аргументов функции распределения нормального закона.

$$b = \frac{\Delta 2\%}{\Delta_{\text{пр}}}, \quad \Delta_1 = 1 - b, \quad \Delta_2 = 1 + b.$$

Определим вычисление аргументов функции распределения нормального закона.

$$x_1 = \frac{\Delta_1}{S}, \quad x_2 = \frac{\Delta_2}{S}.$$

Вычислим вероятность признания годным прибор по результатам проведения поверки КИП, в данном случае $\Phi(x)$ — функция распределения Лапласа, и произведем вычисление вероятности браковки измерительного устройства. В функции будем использовать b_1 — отношения погрешности показания самого прибора, среднее значение, к пределу допускаемой погрешности

$$P_G = \Phi(x_1) + \Phi(x_2), \quad P_B = 1 - P_G,$$

$$P_G(b_1) = \Phi \left| \frac{1 - b_1}{S_1} \right| + \Phi \left| \frac{1 + b_1}{S_1} \right| - 1.$$

В табл. 4 приведены итоговые значения проводимых расчетов

По полученным расчетным соотношениям построим график оперативной характеристики поверки (рис. 1).

Область под графиком оперативной характеристики поверки, до единицы, подразумевает зону принятия КИП годным, выделенная область $f1$ — зону фиктивного брака, вероятность принятия негодным заведомо годного измерительного устройства, область $f2$ — область не обнаружения брака, зона принятия годным дефектного прибора. Идеальная характеристика имеет П образную форму, но в действительности можно наблюдать медленный спад, чем больше угол наклона графика, тем больше вероятность получения некорректных результатов тестирования. Испытуемый вольтметр, по результатам поверки, оказался годным, при этом имея отличный показатель отклонения погрешности, но в тоже время мы можем наблюдать на графике значительную вероятность возникновения ошибки в процедуре тестирования. Что касается сравнения теоретических показаний технологии компьютерного зрения и поверки оператора, можно заметить значительное уменьшение вероятности некорректных принятий годными и негодными КИП, и повышения показателя принятия устройств годными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог результатов проводимого исследования можно сказать следующее. Перед проведением автоматизации технологических процессов всегда необходимо обращаться к теоретическим математическим расчетам, на предмет оценивания целесообразности внедрения той или иной технологии [13–15]. Несмотря на изначально небольшую разницу в субъективной погрешности и технологии компьютерного зрения, около 0.05, расчетный показатель снижения вероятности возникновения ошибки в процессе аттестации КИП оказался значительным. На этапе расчета средней погреш-

Таблица 4. Результаты расчетов

Величина	Расчетное значение	
	поверка оператором	поверка технологией компьютерного зрения
a_2	11.722	11.748
c	10	
a_{2M}	117.22	117.48
ΔI^2	114.961284 22.867524 0.039204 26.708224 102.779044	115.519504 22.829284 0.040804 26.749584 103.063104
D_{a1_m}	66.83882	67.05057
D_{a2}	13.367764	13.410114
S_{a2}	36.5619529	36.6198225
a_0	118	
S_{a0}	0	
$\Delta 2$	-0.78	-0.52
$\Delta 2\%$	0.661016949	0.440677966
$S_{\Delta 2}$	0.661016949	0.440677966
$S_{\% \Delta 2}$	0.560183855	0.373455903
S	0.224073542	0.149382361
b	0.26440678	0.176271186
Δ_1	0.73559322	0.823728814
Δ_2	1.26440678	1.176271186
x_1	3.282820513	5.514230769
x_2	5.642820513	7.874230769
b_1	0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.2 1.4 1.6	
$\Phi \left \frac{1-b_1}{S_1} \right $	1 0.99982 0.9962 0.962877 0.8139 0.5 0.8139 0.962877 0.9962	1 1 1 0.9962 0.8904 0.5 0.8904 0.9962 1

Таблица 4. Окончание

Величина	Расчетное значение	
	поверка оператором	поверка технологией компьютерного зрения
$\Phi \left \frac{1 + b_1}{S_1} \right $	1	1
$P_G(b_1)$	1	1
	0.99982	1
	0.9962	1
	0.962877	0.9962
	0.8139	0.8904
	0.5	0.5
	0.1861	0.1096
	0.037123	0.0038
	0.0038	0

ности показаний прибора можно заметить значительную разницу между проверкой человека и машиной на уровне 35%. Оценивания расчётные результаты полученных данных можно сказать о снижении возможности принятия фиктивного брака или не обнаружении брака в районе до 25%, что является значительным показателем улучшения при автоматизации технологического про-

цесса аттестации и говорит о целесообразности внедрения технологии компьютерного зрения.

Результаты проводимого исследования подтверждают необходимость использования цифровой технологии технического зрения в процесс проверки КИП, с целью автоматизации производственной задача. Для наиболее обширного и полного исследования необходимо произвести опытное испыта-

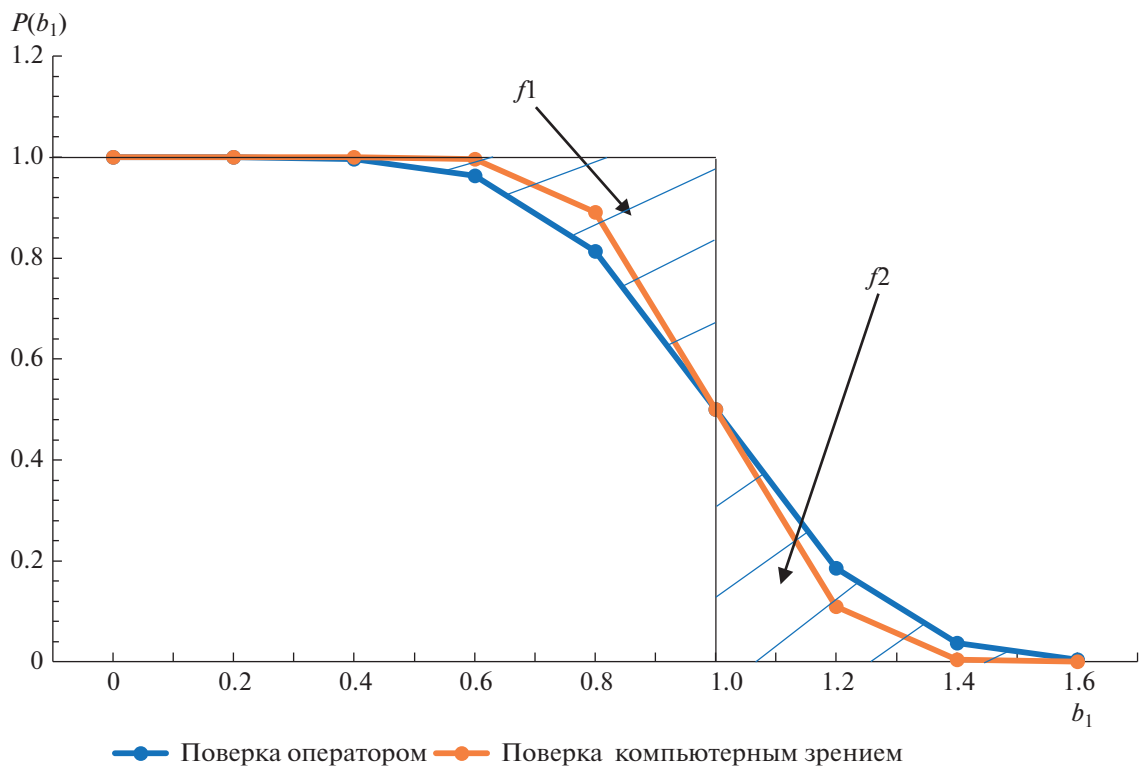


Рис. 1. График оперативной характеристики поверки вольтметра Э8030-М1.

ние различного рода измерительных устройств на оценку качества внедряемой технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Нецветаев А.Г.* // Горная промышленность. 2020. № 5. С. 108–114.
2. ГОСТ Р 57306-2016. Национальный стандарт Российской Федерации. Инжиниринг. Терминология и основные понятия в области инжиниринга.
3. *Бобрышов А.П., Солёный С.В.* // Инновационное приборостроение 2022. № 2. С. 6–11.
4. МИ 187-86. Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Достоверность и требования к методикам поверки средств измерений.
5. *Рубцова С.В., Охрименко О.И., Алейникова О.А.* Уч.-метод. пособие. Шахты: ИСОиП. Основы теории погрешностей. 2019. С. 11–14.
6. *Бурмистров В.В.* Краткая теория погрешностей. Изд. 3-е. 2008. Коломна: РИЗА. С. 11–12.
7. Метрологическое обеспечение производства в машиностроении. 2017. С. 76–79.
8. Метрологические основы поверки и калибровки. 2018. С. 54–60.
9. ГОСТ 8.497–83 Межгосударственный стандарт. Государственная система обеспечения единства измерений. Амперметры, Вольтметры. Ваттметры, варметры. Методика поверки.
10. *Бобрышов А.П.* // Сб. тр. III Междуна. научно-исследовательского конкурса. 2022. Петрозаводск: МЦНП “Новая наука”. Ч. 1. С. 61–69.
11. *Зубарь А.В., Хамитов Р.Н., Кайков К.В.* // Изв. томского политех. унив. Инжиниринг георесурсов. 2021. № 4. С. 181–191.
12. *Горячкин Б.С., Китов М.А.* // E-scio. 2020. № 9. С. 317–345. <https://e-scio.ru/?p=11519>.
13. *Кузенов В.В., Рыжков С.В.* // ТВТ. 2021. Т. 59 (4). С. 492–501.
14. *Ryzhkov S.V.* // Sustain. Cities Soc. 2015. V. 14. P. 313–315.
15. *Даниленко А.В., Сержантова М.В.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2023. Т. 14 (5). С. 470–475.

Theoretical Evaluation of the Influence of Automation on the Production Process of Verification of Testing and Measuring Instruments

**A. P. Bobryshov^{1, *}, S. V. Solony¹, M. V. Serzhantova¹,
V. P. Kuzmenko¹, M. E. Sozdateleva¹, and R. V. Rudakov¹**

¹St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, 190000 Russia

*e-mail: ap.bobryshov@mail.ru

Received January 20, 2023; revised February 13, 2023; accepted April 13, 2023

Abstract—The subject of the research of this article is the evaluation of the solution of automation of the engineering problem of performing verification of control and measuring instruments, by introducing digital computer vision technology into the technological process. Optimization of the production process, digital computer vision technology allows you to eliminate the detrimental effect of a separate number of errors and, by reducing the time spent on the verification, reducing the impact of high temperature processes on the measuring equipment. The construction of the operational characteristic of verification is carried out taking into account subjective errors, such as the interpolation and parallax error, which appear in the case of a human performing the testing task. The constructed dependence is compared with the graph results, based on the verification performance when introducing computer vision technology into the technological process.

Keywords: computer vision (CV), verification, engineering, control and measuring device (CMD), probability, operational characteristic of verification, standard, high-temperature process, engineering applications