

МЕТРОЛОГІЯ ТА ПРИЛАДИ

METROLOGY AND INSTRUMENTS

3|2020

МІЖНАРОДНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

МЕТРОЛОГІЧНА ПРОСТЕЖУВАНІСТЬ

ТОЧНІСТЬ ТА ДОСТОВІРНІСТЬ

ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА СЕНСОРИ

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА ПРИСТРОЇ

МОДЕЛІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ

МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ

ВІЙСЬКОВА МЕТРОЛОГІЯ

КОМПЕТЕНТНІСТЬ ЛАБОРАТОРІЙ



Вимірйте
усе доступне вимірюванню
й робіть недоступне вимірюванню
доступним.

Галілео Галілей

Засновники:

Академія метрології України,
Харківський національний
університет радіоелектроніки (ХНУРЕ),
Державне підприємство
«Всеукраїнський державний
науково-виробничий центр
стандартизації метрології, сертифікації
та захисту прав споживачів»
(ДП «Укрметрестандарт»),
ТОВ Виробничо-комерційна
фірма (ВКФ) «Фавор ЛТД»

Видається з березня 2006 року
Рік випуску п'ятнадцятий
Передплатний індекс 92386

Головний редактор

Володарський Є. Т., д. т. н., проф.

Редакційна колегія:

Захаров І.П., д. т. н., проф.
Коломієць Л.В., д. т. н., проф.
Косач Н.І., д. т. н., проф.
Косхева Л.О., д. т. н., проф.
Козловий М.Д., д. т. н., проф.
Кучерук В.Ю., д. т. н., проф.
Кухарчук В.В., д. т. н., проф.
Назаренко Л.А., д. т. н., проф.
Пістун Є.П., д. т. н., проф.
Семенець В.В., д. т. н., проф.
Середюк О.Є., д. т. н., проф.
Туз Ю.М., д. т. н., проф.

Іноземні члени редколегії:

Tadeusz Skubis, dr hab. inż., prof.
(Польща)
Zygmunt Warza, doc., dr inż. (Польща)
Mykhalchenko V.M., k. t. n. (Казахстан)

Експертна рада:

Большаков В.В., д. т. н., с. н. с.,
заступник головного редактора
Кузьменко Ю.В., к. т. н., с. н. с.
Петришин І.С., д. т. н., проф.
Рожнов М.С., к. х. н., с. н. с.
Сурду М.М., д. т. н., проф.

Редакційна група:

Фісун В.П., заступник головного
редактора
Винокуров Л.І., науковий редактор —
відповідальний секретар
Проненко М.П., модератор сайту,
дизайнер
Зайцев Ю.О., дизайнер-верстальник

Адреса редакції:

61001, Харків, вул. Ризівська, 11, к. 2;
Тел.: (057) 703-23-28; (095) 00-68-665
E-mail: metrolog-prylady@ukr.net
http://www.amu.in.ua/journal1
https://mmi-journal.org/index.php/
journal/issue/view/1

Видавець та виготовлювач:

ВКФ «Фавор ЛТД»
61140, Харків, пр-т. Гагаріна, 94-А, кв. 35;
Свідоцтво про внесення
до Держреєстру видавців,
виготовників і розповсюджувачів
видавничої продукції
серія ХК № 90 від 17.12.2003.

Підписано до друку 05.07.2020.
Формат 60×84/8. Папір крейдований.
Ум. друк. арк. 843. Обл.-вид. арк. 713.
Друк офсетний. Тираж 400 прим.
Замовлення № 23.

ISSN 2307-2180

Метрологія



Та прилади

METROLOGY AND INSTRUMENTS

№ 3(83), 2020

Науково-виробничий журнал
Scientific and production journal

Журнал зареєстровано
у Міністерстві юстиції України,
свідоцтво серія КВ № 22796-12696ПР
від 03.07.2017;
включено до Переліку наукових
фахових видань України, в яких
можуть публікуватися результати
дисертаційних робіт на здобуття наукових
ступенів доктора наук, кандидата наук
та ступеня доктора філософії (категорія В),
затвердженого Наказом Міністерства освіти
і науки України № 409 від 17.03.2020
Журнал включено до Міжнародної
наукометричної бази даних
Index Copernicus, лист від 08.03.2013
ICV 2018 = 56,77

The Journal is Registered
in Ministry of Justice of Ukraine,
Certificate series KB № 22796-12696PR
dated 03.07.2017;

is included to the List of scientific
professional publications of Ukraine,
in which the results of dissertations
for the degree of doctor of sciences,
candidate of sciences and the degree
of doctor of philosophy (category B),
may be published, approved by the order
of the Ministry of Education and Science
of Ukraine No. 409 dated 17.03.2020
The journal is included in the International
Scientific Databases Index Copernicus, Letter
dated 08.03.2013
ICV 2018 = 56,77

Co-founders:

Kharkiv National University
of Radio Electronics (KNURE);
Public Organization
«Academy of Metrology of Ukraine»;
State Enterprise «Ukrainian State
Research and Production Centre
for Standardisation, Metrology,
Certification and Consumers
Rights Protection»
(SE «Ukrmetreststandart»);
LLC Production and Commercial Firm
(PCF) «FAVOR, LTD»

Published since march 2006.
Release year fifteenth
Subscription index 92386.

Chief editor:

Volodarskyi Ye.T., D.Sc. (Eng.), prof.

Editorial board:

Kolomyiets L.V., D.Sc. (Eng.), prof.
Kosach N.I., D.Sc. (Eng.), prof.
Kosheva L.O., D.Sc. (Eng.), prof.
Koshoviy M.D., D.Sc. (Eng.), prof.
Kucheruk V.Yu., D.Sc. (Eng.), prof.
Kukharchuk V.V., D.Sc. (Eng.), prof.
Nazarenko L.A., D.Sc. (Eng.), prof.
Pistun Ye.P., D.Sc. (Eng.), prof.
Semenets V.V., D.Sc. (Eng.), prof.
Serediuk O.Ye., D.Sc. (Eng.), prof.
Tuz Yu.M., D.Sc. (Eng.), prof.
Zakharov I.P., D.Sc. (Eng.), prof.

Foreign members of the editorial board:

Tadeusz Skubis, prof. dr hab. inż.
(Poland)
Zygmunt Warza, doc., dr inż. (Poland)
Mykhalchenko V.M., Ph.D.
in Engineering Science (Kazakhstan)

Advisory Board:

Bolshakov V.B., D.Sc. (Eng.), S.Sc.Off.
Deputy Chief Editor
Kuzmenko Yu.V., Ph.D. (Eng.), S.Sc.Off.,
Petryshyn I.S., D.Sc. (Eng.), prof.
Rozhnov M.S., Ph.D. (Chem.), S.Sc.Off.
Surd M.M., D.Sc. (Eng.), prof.

Editorial Team:

Fisun V.P., Deputy Chief Editor
Vynokurov L.I., Scientific Editor,
Executive Secretary
Pronenko M.P., site moderator, designer
Zaitsev Yu.O., maker-up designer

Editorial Address:

61001, Kharkiv, st. Ryzhivska, 11, r. 2;
tel.: (057) 703-23-28; (095) 00-68-665
e-mail: metrolog-prylady@ukr.net
https://www.amu.in.ua/journal1
https://mmi-journal.org/index.php/
journal/issue/view/1

Publisher and manufacturer:

PCF «FAVOR LTD»
61140, Kharkiv,
pr-t. Gaгарin, 94-A, sq. 35;
Certificate of inclusion in the State
Register of Publishers, Manufacturers
and Distributors of Publishing Products,
series XK № 90 dated 17.12.2003.

Signed for printing dated 05.07.2020
Format 60 × 84/8. Paper is coated.
Conditional printed sheets 8.43.
Accounting and publishing sheets 7.13.
Offset printing. Circulation 400 copies
Order number 23.

ISSN (print) 2307-2180
ISSN (online) 2663-9564
DOI: 10.33955/2307-2180

ЗМІСТ / CONTENTS

МІЖНАРОДНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО		INTERNATIONAL COOPERATION	
Вітальне послання директора Міжнародних бюро мір і ваг Мартіна Мілтона та законодавчої метрології Ентоні Доннеллана з нагоди Всесвітнього дня метрології 2020	3	Messages from the Directors of the BIPM Martin Milton and of the BIML Anthony Donnellan dedicated to the World Metrology Day 2020	
МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ		METROLOGICAL ASSURANCE	
Глебов А. Б., Кисель С. П., Якубов С. Е., Згуря В. И. Система метрологічного забезпечення измерень в області контролю за обертанням гідрохлорфторуглеродів	4	Glebov A. B., Kiselev S. P., Yakubov S. E., Zghuria V. I. The System of Metrological Support of Measurements in the Field of Control Over the Circulation of Hydrochlorofluorocarbons	
ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ		ERRORS AND UNCERTAINTY	
Гринев Б. В., Гурджян Н. Р., Зеленская О. В., Любинский В. Р., Молчанова Н. И., Мицай Л. И., Тарасов В. А. Восходящий и нисходящий подходы к оцениванию неопределенности измерений светового выхода сцинтилляторов (обзор)	12	Grynyov B. V., Gurdzhian N. R., Zelenskaya O. V., Lyubynskiy V. R., Molchanova N. I., Mitsay L. I., Tarasov V. A. Ascending and Descending Approaches to Estimating the Uncertainty of Measurements of the Light Output of Scintillators (REVIEW)	
МЕТРОЛОГІЧНА ПРОСТЕЖУВАНІСТЬ		METROLOGICAL TRACEABILITY	
Мельников О. О., Гаврилкин В. Г., Петренко А. В., Манько О. О., Левбарг О. С. Метрологічна простежність результатів вимірювання рН в Україні	21	Meinikov O. O., Gavrilkin V. G., Petrenko A. V., Manska O. O., Levbarg O. S. Metrological traceability of pH measurements in Ukraine	
ТОЧНІСТЬ ТА ДОСТОВІРНІСТЬ		ACCURACY AND RELIABILITY	
Купко О. Д. Аналіз точності способів розрахунку площі квадратної діафрагми методом Монте-Карло	26	Kupko O. D. Analysis of Exactness of Methods of Calculation of Area of Square Diaphragm By the Method of Monte Carlo	
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА СЕНСОРИ		CONVERTERS AND SENSORS	
Граник В. Ф., Кухарчук В. В. Математична модель накладного трансформаторного вихрострумовеого первинного вимірювального перетворювача абсолютного переміщення	32	Hraniak V. F., Kukharchuk V. V. Mathematical Model of Overhead Transformer Eddy Current Sensor of Absolute Movement	
ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА ПРИСТРОЇ		MEASURING INSTRUMENTS AND DEVICES	
Черепашук Г. А., Калашников Е. Е., Потыльчак А. П. Весомизмерительные устройства для работы в специальных условиях эксплуатации	38	Cherepashchuk G. A., Kalashnikov E. E., Potylchak A. P. Weight Measuring Devices for Work In Special Conditions of Operation	
МОДЕЛІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ		MODELS AND MODELING	
Літвінов К. А. Математичні моделі реактора аміачної селітри з коливально імпульсним трендом вимірювальних параметрів	45	Litvinov K. A. Mathematical Models of the Reactor of Ammonia Selectra with Oscillatory Impulsed Trend of Measuring Parameters	
ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ		PARAMETERS AND CHARACTERISTICS	
Григоренко І. В., Григоренко С. М., Боженко М. М. Аналіз кореляції за оцінювання невизначеності результатів вимірювання температури у процесі виготовлення губної помади	50	Hryhorenko I. V., Hryhorenko S. M., Bozhenko M. M. Analysis of Correlation in the Evaluation of the Uncertainty of the Results of Temperature Measurement in the Process of Manufacturing Lipstick	
МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ		METHODS AND PROCEDURES	
Козубовський В. Р., Алякшеев І. П. Методи термостабілізації датчиків газу	56	Kozubovsky V. R., Aljakshev I. P. Methods of Thermostabilization of Gas Sensors	
ВІЙСЬКОВА МЕТРОЛОГІЯ		MILITARY METROLOGY	
Бойко В. М. Узагальнена інформаційна модель системи метрологічного контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти, що використовуються в Збройних Силах України: актуальні питання оптимізації системи	61	Bojko V. M. Generalized Information Model of System of the Metrological Control and Management of Reference Signals of Time and Frequency which are Used in Armed Forces of Ukraine: Pressing Questions of Optimization of System	
КОМПЕТЕНТНІСТЬ ЛАБОРАТОРІЙ		COMPETENCE OF LABORATORIES	
Никитюк О. А., Новіков В. М. Управління ризиками у лабораторії в рамках вимог ДСТУ ISO/IEC 17025:2017	67	Nykytyuk O. A., Novikov V. M. Laboratory Risk Management Within the Requirements of DSTU ISO / IEC 17025: 2017	
ІНФОРМАЦІЯ		INFORMATION	
	49		

DOI: 10.33955/2307-2180(3)2020.50-55

АНАЛІЗ КОРЕЛЯЦІЇ ЗА ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ У ПРОЦЕСІ ВИГОТОВЛЕННІ ГУБНОЇ ПОМАДИ

Analysis of Correlation in the Evaluation of the Uncertainty of the Results of Temperature Measurement in the Process of Manufacturing Lipstick

І. В. Григоренко, кандидат технічних наук,
професор кафедри інформаційно-вимірвальних
технологій і систем,
e-mail: grigmaestro@gmail.com

С. М. Григоренко, кандидат технічних наук,
доцент кафедри,
e-mail: sngloba@gmail.com

М. М. Боженко, магістр кафедри,
e-mail: fish0849@gmail.com

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
Україна

I. V. Hryhorenko, candidate of technical sciences,
professor of the department of information and
measurement technologies and systems,
e-mail: grigmaestro@gmail.com

S. M. Hryhorenko, candidate of technical sciences,
associate professor of the department,
e-mail: sngloba@gmail.com

M. M. Bozhenko, master of the department,
e-mail: fish0849@gmail.com
National technical university
«Kharkiv Polytechnic Institute»,
Ukraine

Розглянуто вирішення науково-практичної задачі визначення кореляції між результатами вимірювання температур, що отримані за допомогою двох датчиків TMP36 та DS18B20, мікроконтролерної плати Arduino Uno, а також програмного забезпечення для системного проектування — LabVIEW. Наведено схеми підключення датчиків до плати Arduino Uno та блок-діаграму перевірки датчика температури, що сконструйована за допомогою програмного забезпечення для системного проектування — LabVIEW. Виконано обчислення коефіцієнту кореляції. Зроблено перевірку значимості коефіцієнту кореляції, що обчислений за обмеженою кількістю спостережень. Проведено розрахунок сумарної стандартної невизначеності для корельованих даних. Зроблено висновок стосовно того, що ігнорування кореляції в цьому випадку призвело б до збільшення значення сумарної стандартної невизначеності. Розрахунок розширеної невизначеності для корельованих даних надає можливість зробити висновок, що ігнорування кореляції призвело б до не виправданого збільшення розширеної невизначеності.

The paper considers the solution of the scientific and practical problem of determining the correlation between the results of temperature measurements obtained using TMP36 and DS18B20; the Arduino Uno microcontroller board, as well as the software for system design — LabVIEW. The diagrams of connecting the sensors to the Arduino Uno

board and the flowchart of the temperature sensor calibration, designed with the help of system design software — LabVIEW. The correlation coefficient is calculated. A check was made of the significance of the correlation coefficient calculated from a limited number of observations. The calculation of the total standard uncertainty for the correlated data is carried out. It is concluded that ignoring the correlation in this case would lead to an increase in the value of the total standard uncertainty. The calculation of the expanded uncertainty for the correlated data made it possible to conclude that ignoring the correlation would lead to an unjustified increase in the expanded uncertainty.

Correlation analysis made it possible to measure the degree of influence of factor traits on the outcome, to establish a single measure of the closeness of connection and the role of the studied factor in the overall change of the trait. The correlation method allowed to obtain quantitative characteristics of the degree of connection between the two traits, gave a broader idea of the relationship between them. The links between the factors are quite diverse. The meaning of correlation analysis to control the parameters of the technological process of manufacturing lipstick is to determine the quantitative measure of the similarity of different signals.

The process of making lipstick involves a complex algorithm of sequential and parallel actions that must be very clearly regulated and under constant control.

Ключові слова: невизначеність вимірювань, кореляція, температура, вимірвач, датчик, похибка,
губна помада.
Keywords: measurement uncertainty, correlation, temperature, meter, sensor, error, lipstick.



І. В. Григоренко



С. М. Григоренко



М. М. Боженко

ВСТУП

Кореляційний аналіз дає можливість виміряти ступінь впливу факторних ознак на результати, встановити єдину міру тісноти зв'язку та роль досліджуваного фактора (факторів) у загальній зміні результативної ознаки. Кореляційний метод дозволяє отримати кількісні характеристики ступеня зв'язку між двома і більшим числом ознак, дає більш широке уявлення стосовно зв'язку між ними. Зв'язки між факторами достатньо різноманітні. При цьому одні ознаки виступають у ролі факторів, що діють на інші, зумовлюючи їх зміну, інші — в ролі дії цих факторів. Сенс кореляційного аналізу щодо контролю параметрів технологічного процесу виготовлення губної помади полягає у визначенні кількісної міри схожості різних сигналів. Взаємна кореляційна функція різних сигналів описує як ступінь подібності форми двох сигналів, так й їх взаємне розташування відносно одного до одного за координатою (незалежної змінної) [1].

Процес виготовлення губної помади включає складний алгоритм послідовних та перебувати дій, які мають бути дуже чітко врегульовані та знаходитись під постійним контролем. Необхідність дослідження пов'язана з тим, що своєчасний контроль параметрів технологічного процесу на кожному етапі дозволяє підвищити якість виготовлення губної помади, своєчасно прогнозувати відмову датчиків та призначати міжповірочні інтервали для первинних вимірювальних перетворювачів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Основні етапи виробництва губної помади та обладнання, необхідного для її виробництва, представлено у [2]. У роботі [3] обґрунтовано необхідність створення структурної схеми мікроконтролерного вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення губної помади. У роботі [4] розглянуто структурну схему мікроконтролерного вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення губної помади, а також зазначено основні його характеристики. У роботі [5] доведено необхідність визначення взаємної кореляції параметрів технологічного процесу під час виготовлення губної помади для того, щоби мати можливість впливати на якість готової продукції. Однак залишається невирішеним питання визначення кореляції за оцінювання невизначеності результатів вимірювання температури у процесі виготовлення губної помади.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ

Кореляція між величинами a та b , що належать двом процесам, називається лінійною, якщо обидві функції регресії лінійні. У такому випадку лінії регресії перетворюються у прямі регресії, кутові коефіцієнти яких виражаються через коефіцієнт кореляції. Цей коефіцієнт виступає мірою лінійної залежності між величинами [6].

Позначимо коефіцієнт кореляції через k . Тоді коефіцієнтом кореляції між двома випадковими величинами a і b називається математичне очікування добутку їх нормованих відхилень

$$k = M \left[\frac{a-c}{\sigma_a} \cdot \frac{b-d}{\sigma_b} \right], \quad (1)$$

де $c = M[a]$ та $d = M[b]$ — центри розподілу величин a та b ;

σ_a та σ_b — дисперсії величин a і b .

Коефіцієнт кореляції k може бути записаний за однією із таких форм:

$$k = \frac{1}{\sigma_a \sigma_b} \cdot M[(a-c) \cdot (b-d)], \quad (2)$$

або

$$k = \frac{M[ab] - M[a]M[b]}{\sigma_a \sigma_b}. \quad (3)$$

Величину $M[(a-c) \cdot (b-d)]$ називають кореляційним моментом.

Коефіцієнт кореляції k є безрозмірною величиною, абсолютне значення якої не перевищує одиниці: $|k| \leq 1$. Для незалежних величин a і b коефіцієнт кореляції дорівнює нулю, але й для залежних величин коефіцієнт кореляції може бути рівним нулю. У такому випадку величини a і b називають некорельованими [6].

Коефіцієнт кореляції k характеризує міру лінійної залежності між величинами a і b . Це означає, якщо $Aa+B$ є лінійною функцією найкращого середньоквадратичного наближення до величини b , тобто функцією, для якої математичне очікування $M[b - (Aa+B)]^2$ досягає найменшого значення, то математичне очікування випадкової величини $z = b - (Aa+B)$, що є похибкою наближення, дорівнює нулю. Відношення дисперсії σ_z^2 до дисперсії величини b визначається лише величиною коефіцієнта кореляції за формулою:

$$\frac{\sigma_z^2}{\sigma_b^2} = 1 - k^2. \quad (4)$$

Аналогічно, якщо $Cb+D$ є лінійною функцією найкращого середньоквадратичного наближення до величини a і $f = a - (Cb+D)$, що є похибкою цього наближення, то

ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ

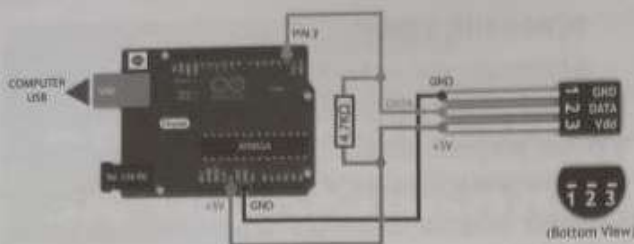


Рис. 1. Типове підключення датчика DS18B20
Fig. 1. Connect DS18B20 sensors to the Arduino Uno

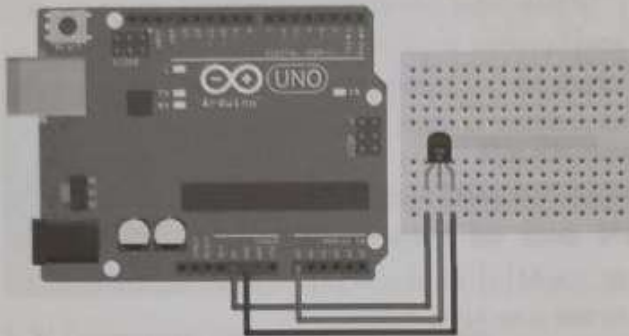


Рис. 2. Типове підключення датчика TMP36
Fig. 2. Connect TMP 36 sensors to the Arduino Uno

$$\frac{\sigma_f^2}{\sigma_a^2} = 1 - k^2. \quad (5)$$

Якщо коефіцієнт кореляції k дорівнює нулю, то немає лінійної кореляції, але це не виключає наявності нелінійної кореляції.

Чим ближче $|k|$ до одиниці, тим тісніша лінійна залежність між величинами, тобто тим менша середня квадратична похибка визначення кожної з величин за допомогою лінійної функції іншої величини. Рівняння $|k| = 1$ означає наявність лінійної функціональної залежності між величинами a і b (кожному значенню однієї з величин відповідає точно одне значення іншої величини) [6].

Для перевірки якості функціонування датчика температури TMP36 обираємо більш точний за метрологічними характеристиками датчик температури DS18B20. Отримання результатів вимірювання температури виконуємо за допомогою мікроконтролерної плати Arduino Uno [8], а також програмного забезпечення для системного проектування — LabVIEW. Датчики було встановлено на столі в зоні «вистрілювання» олівців губної помади у пенал.

Для використання TMP36 достатньо підключити лівий конектор датчика (V_{dd}) до джерела живлення (2,7—5,5 В), а правий — до землі. З середнього конектора знімають аналогове значення напруги, яке прямо пропорційне (лінійна залежність) температурі. Значення аналогової напруги не залежить від джерела живлення.

Схеми типового підключення датчиків DS18B20 та TMP 36 до плати Arduino Uno представлено

на рис. 1. та рис. 2 відповідно [8].

Для проведення досліджень було зібрано схему, представлену на рис. 3.

Блок-діаграму перевірки датчика температури сконструйовано за допомогою програмного забезпечення для системного проектування — LabVIEW і представлено на рис. 4.

Порівняльний аналіз здійснюється за 30 контрольними точками. Дані, отримані за допомогою датчика температури TMP36, представлено у виді діаграми на рис. 5. Дані, отримані від датчика температури DS18B20, представлено на рис. 6.

Похибка досліджуваного пристрою визначається за різницею показань еталонного та досліджуваного приладу (6) із застосуванням статистичного опрацювання результатів. Похибка не повинна перевищувати клас точності термоопору за нормативно-технічною документацією (НТД):

$$\delta_i = \frac{t_{\text{ДАТЧ}} - t_{\text{ЕТАЛ}}}{t_{\text{ЕТАЛ}}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

де $t_{\text{ДАТЧ}}$ — температура, отримана за допомогою датчика TMP36;

$t_{\text{ЕТАЛ}}$ — температура, отримана за допомогою еталонного датчика DS18B20.

Результати вимірювань температури наведено у табл. 1. За калібрування датчика було проведено

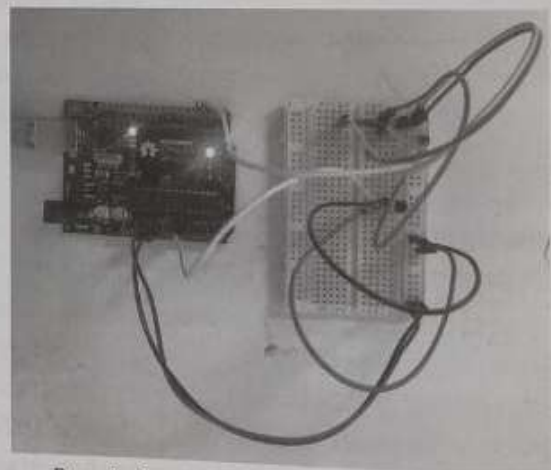


Рис. 3. Схема вимірювального приладу
Fig. 3. Scheme of the measuring device

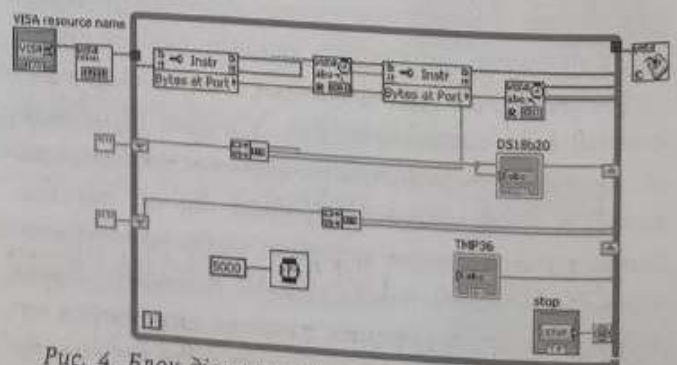


Рис. 4. Блок-діаграма контролю роботи датчиків температури
Fig. 4. Flowchart of temperature sensors control



Рис. 5. Результати спостережень за зміною температури столу в зоні «вистрілювання» олівців у пенал за допомогою датчика температури TMP36

Fig. 5. The results of observations of changing the temperature of the table in the area of «shooting» pencils in the pencil box using the temperature sensor TMP36

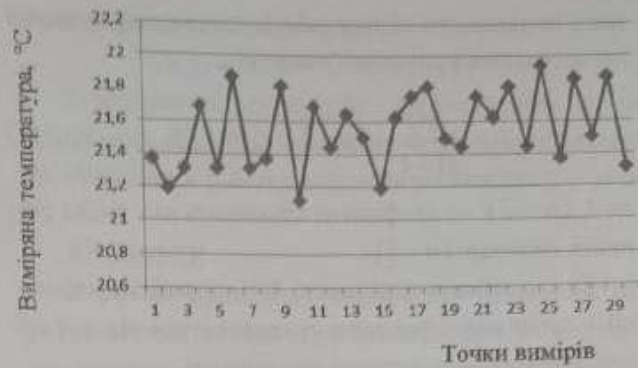


Рис. 6. Результати спостережень за зміною температури столу в зоні «вистрілювання» олівців у пенал за допомогою датчика температури DS18B20

Fig. 6. The results of observations of changing the temperature of the table in the area of «shooting» pencils in the pencil case using the temperature sensor DS18B20

одночасні дев'ятикратні вимірювання температури еталонним ($t_{\text{ЕТАЛОН}}$) DS18B20 і датчиком температури ($t_{\text{ДАТЧ}}$) TMP36, що калібрується.

Із табл. 1 видно, що максимальна похибка дорівнює 1,52 і не перевищує максимально допустимої похибки датчика TMP36, наведеної в НТД.

Наведені результати вимірювань повинні бути корельовані, оскільки загальним джерелом, що впливає на результати вимірювань температур, є нестабільність температури датчика.

ОБЧИСЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КОРЕЛЯЦІЇ

За наявності узгоджених пар вимірювань $t_{\text{ЕТАЛОН}}$ та $t_{\text{ДАТЧ}}$, $q = 1, 2, \dots, n$, коефіцієнт кореляції обчислюється за типом А за формулою [9]:

$$k_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}} = \frac{\sum_{q=1}^n (t_{\text{ЕТАЛОН } q} - \bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}})(t_{\text{ДАТЧ } q} - \bar{t}_{\text{ДАТЧ}})}{\sqrt{\sum_{q=1}^n (t_{\text{ЕТАЛОН } q} - \bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}})^2 \sum_{q=1}^n (t_{\text{ДАТЧ } q} - \bar{t}_{\text{ДАТЧ}})^2}} = (7)$$

$$= \frac{1}{n(n-1)} \frac{\sum_{q=1}^n (t_{\text{ЕТАЛОН } q} - \bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}})(t_{\text{ДАТЧ } q} - \bar{t}_{\text{ДАТЧ}})}{u_A(\bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}})u_A(\bar{t}_{\text{ДАТЧ}})}$$

Опрацювання даних табл. 1 дало такі результати:

- середні значення показань:

$$\bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}} = 21,515 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\bar{t}_{\text{ДАТЧ}} = 21,404 \text{ } ^\circ\text{C};$$

- стандартні невизначеності типу А вимірювання температур:

$$u_A(\bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}}) = \delta_{\text{ЕТАЛОН}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} = 0,095 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (8)$$

$$u_A(\bar{t}_{\text{ДАТЧ}}) = \delta_{\text{ДАТЧ}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} = 0,12 \text{ } ^\circ\text{C};$$

- коефіцієнт кореляції між результатами вимірювання температур

$$k_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}} = 0,899.$$

ПЕРЕВІРКА ЗНАЧИМОСТІ КОЕФІЦІЄНТА КОРЕЛЯЦІЇ, ОБЧИСЛЕНОГО ЗА ОБМЕЖЕНОЮ КІЛЬКІСТЮ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

За обмеженого числа спостережень розраховане значення коефіцієнта кореляції може відрізнятися від нуля навіть тоді, коли кореляція повинна бути відсутня із загально фізичних міркувань [9]. Перевірити значимість коефіцієнта кореляції для

Таблиця 1. Результати вимірювань температури еталонним ($t_{\text{ЕТАЛОН}}$) DS18B20 і датчиком температури ($t_{\text{ДАТЧ}}$) TMP36, що калібрується

Table 1. The results of temperature measurements with the reference ($t_{\text{ЕТАЛОН}}$) DS18B20 and temperature sensor ($t_{\text{ДАТЧ}}$) TMP36, calibrated

$t_i, \text{ } ^\circ\text{C}$	21,1	21,2	21,3	21,4	21,5	21,6	21,7	21,8	21,9
$t_{\text{ЕТАЛОН}} \text{ DS18B20}$	21,12	21,19	21,31	21,4	21,5	21,62	21,75	21,81	21,94
$t_{\text{ДАТЧ}} \text{ TMP36}$	20,8	21,28	21,29	21,29	21,31	21,31	21,78	21,78	21,8
$\delta t, \%$	1,52	-0,43	0,09	0,51	0,88	1,44	-0,14	0,14	0,64

ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ

його подальшого обліку (або ігнорування) дозволяє застосування критерію Стюдента:

$$\frac{|k|}{\sqrt{1-k^2}} \sqrt{n-2} \geq t_{\alpha}(n-2), \quad (9)$$

де $t_{\alpha}(n-2)$ — коефіцієнт Стюдента для числа ступенів свободи $(n-2)$.

За виконання нерівності (9) коефіцієнт кореляції є значимим і повинен враховуватися під час обчислення невизначеності вимірювань.

Оцінимо значимість коефіцієнта кореляції за калібрування датчика температури:

$$\frac{|0,899|}{\sqrt{1-0,899^2}} \sqrt{9-2} > t_{0,05}(7) \\ 5,444 > 2,364.$$

Отже, коефіцієнт кореляції між показаннями двох термометрів є значимим і повинен враховуватися за розрахунок невизначеності вимірювань.

РОЗРАХУНОК СУМАРНОЇ СТАНДАРТНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ДЛЯ КОРЕЛЬОВАНИХ ДАНИХ

Якщо у модельному рівнянні $y = f(t_1, t_2, \dots, t_m)$ присутні дві вхідні величини (наприклад, $t_{\text{ЕТАЛОН}}$, $t_{\text{ДАТЧ}}$), результати багаторазових вимірювань яких виконані одночасно і корелюють між собою з коефіцієнтом кореляції $k_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}}$, то вираз для сумарної стандартної невизначеності матиме такий вид [9]

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m C_i^2 u^2(t_i) + 2 \cdot k_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}} \times \\ \times C_{\text{ЕТАЛОН}} \cdot C_{\text{ДАТЧ}} \cdot u(t_{\text{ЕТАЛОН}}) \cdot u(t_{\text{ДАТЧ}})} = \\ = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y) + 2 \cdot k_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}} \times \\ \times u_{\text{ЕТАЛОН}}(y) \cdot u_{\text{ДАТЧ}}(y)} \quad (10)$$

У процесі калібрування термометра оцінюють різницю Δ між результатом вимірювання $t_{\text{ЕТАЛОН}}$ еталонного термометра і значенням $t_{\text{ДАТЧ}}$ каліброваного термометра в точці калібрування, тим самим визначають систематичну похибку каліброваного приладу $\Delta = (t_{\text{ЕТАЛОН}} + \Delta_{\text{ЕТАЛОН}}) - (t_{\text{ДАТЧ}} + \Delta_{\text{ДАТЧ}}) + \Delta_r$, (11) де $\Delta_{\text{ДАТЧ}}$ — поправка на калібрування еталонного термометра;

$\Delta_{\text{ЕТАЛОН}}$ — поправка на похибка відліку показань каліброваного термометра;

Δ_r — поправка на нерівномірність розподілу температури в термостаті [9].

Оскільки систематичні складові похибки $\Delta_{\text{ДАТЧ}}$, $\Delta_{\text{ЕТАЛОН}}$, Δ_r за умовами експерименту вважаються відсутніми, то вимірне значення дорівнюватиме

$$\Delta = \bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}} - \bar{t}_{\text{ДАТЧ}} = 0,111 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Дискретність за шкалою каліброваного термометра становить $q = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$ (взято із НТД), тому, за припущення рівномірного розподілу всередині діапазону, стандартна невизначеність відліку каліброваного термометра визначатиметься за формулою:

$$u(\Delta_{\text{ДАТЧ}}) = \frac{q}{2\sqrt{3}} = \frac{0,01}{3,4641} = 0,0029 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Стандартна невизначеність еталонного термометра обчислюватиметься через розширену невизначеність $U_s = 0,005 \text{ } ^\circ\text{C}$, яка взята зі сертифіката про калібрування, за формулою:

$$u(\Delta_{\text{ЕТАЛОН}}) = \frac{U_s}{k_{\text{ок}}}, \quad (12)$$

де U_s — розширена невизначеність еталонного термометра;

$k_{\text{ок}}$ — коефіцієнт охоплення;

$$u(\Delta_{\text{ЕТАЛОН}}) = \frac{0,005}{2} = 0,0025 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Стандартна невизначеність нерівномірності температури термостата визначається через діапазон нерівномірності температури, взятої з нормативної документації на термостат, за формулою

$$u(\Delta_r) = \frac{\theta_r}{\sqrt{3}} = \frac{0,004}{\sqrt{3}} = 0,0023 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Сумарна стандартна невизначеність дорівнюватиме: $u(\Delta) = (u_A^2(\bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}}) + u^2(\Delta_{\text{ЕТАЛОН}}) + u_A^2(\bar{t}_{\text{ДАТЧ}}) + u^2(\Delta_{\text{ДАТЧ}}) + u^2(\Delta_r) - 2 \cdot k_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}} \cdot u_A(\bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}}) \times u_A(\bar{t}_{\text{ДАТЧ}}))^{0,5} = 0,044 \text{ } ^\circ\text{C}.$

Отже, ігнорування кореляції в цьому випадку призвело б до збільшення значення сумарної стандартної невизначеності, а саме

$$u(\Delta) = (u_A^2(\bar{t}_{\text{ЕТАЛОН}}) + u^2(\Delta_{\text{ЕТАЛОН}}) + u_A^2(\bar{t}_{\text{ДАТЧ}}) + u^2(\Delta_{\text{ДАТЧ}}) + u^2(\Delta_r))^{0,5} = 0,145 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

РОЗРАХУНОК РОЗШИРЕНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ДЛЯ КОРЕЛЬОВАНИХ ДАНИХ

При розрахунку розширеної невизначеності для корельованих даних використовуємо формулу [9]

$$U(\Delta) = k_{\text{ок}} \cdot u(\Delta). \quad (13)$$

Оскільки у сумарній стандартній невизначеності $u(\Delta)$ є внески невизначеності, розраховані за типом A, то коефіцієнт охоплення $k_{\text{ок}}$ повинен визначатися як

$$k_{\text{ок}} = t_{0,95}(v_{\text{eff}}), \quad (14)$$

де ефективне число ступенів свободи v_{eff} дорівнюватиме

$$v_{\text{eff}} = (n-1) \frac{u^4(\Delta)}{u_A^4(\Delta_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}}(\Delta))}, \quad (15)$$

де $u_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}}$ — сумарна стандартна невизначеність типу A загального внеску корельованих вхідних

величин, що розраховується у такий спосіб:

$$u_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}}(\Delta) = (u_{\text{ЕТАЛОН, А}}^2(\Delta) + u_{\text{ДАТЧ, А}}^2(\Delta) + 2 \times k_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}} \cdot u_{\text{ЕТАЛОН, А}}(\Delta) \cdot u_{\text{ДАТЧ, А}}(\Delta))^{0,5} \quad (16)$$

За калібрування термостата для наявних вхідних даних отримуємо сумарну стандартну невизначеність типу А згідно з (16) у такий спосіб:

$$u_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}}(\Delta) = 0,048 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Ефективне число ступенів свободи згідно з (15) розраховується як

$$v_{\text{eff}} = (9-1) \cdot \left[\frac{0,044}{0,048} \right]^4 = 5,6,$$

для якого коефіцієнт охоплення $k_{0,95}$ згідно з (14) визначається [7] як

$$k_{0,95} = t_{0,95}(6) = 2,447.$$

Отже, розширена невизначеність вимірювання згідно з (13) дорівнюватиме

$$U(\Delta) = 0,044 \cdot 2,447 = 0,11 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Ігнорування кореляції призвело б до таких оцінок сумарної стандартної невизначеності

$$u_{\text{ЕТАЛОН, ДАТЧ}}(\Delta) = 0,145 \text{ } ^\circ\text{C},$$

ефективного числа ступенів свободи

$$v_{\text{eff}} = (9-1) \cdot \left[\frac{0,145}{0,145} \right]^4 = 8,$$

для якого

$$k = t_{0,95}(8) = 2,306.$$

і розширеної невизначеності


$$U(\Delta) = 2,306 \cdot 0,145 = 0,334 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Із отриманих результатів стає очевидним, що ігнорування кореляції призвело б до невиправданого збільшення розширеної невизначеності у 3 рази.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено визначення кореляції між результатами вимірювань температури за датчиками, встановленими на столі у зоні «вистрілювання» олівців губної помади у пенал. Експериментальні дані отримано за допомогою мікроконтролерної плати *Arduino Uno*, а також із використанням програмного забезпечення для системного проектування — *LabVIEW*. Виконано обчислення коефіцієнта кореляції. Зроблено перевірку значимості коефіцієнта кореляції, розрахованого за обмеженою кількістю спостережень. Проведено розрахунок сумарної стандартної невизначеності для корельованих даних. Доведено, що ігнорування кореляції в цьому випадку привело б до збільшення значення сумарної стандартної невизначеності у 3,3 рази. Розрахунок розширеної невизначеності для корельованих даних засвідчив, що ігнорування кореляції призвело б до невиправданого збільшення розширеної невизначеності у 3 рази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Цифровая обработка сигналов (Tsyfrovaia obrabotka signalov) — [www. http:// books.ifmo.ru / file / pdf / 1075.pdf](http://books.ifmo.ru/file/pdf/1075.pdf).
2. Как делают помады и блески для губ (Kak delaiut pomady u blesky dlia hub) — [// http:// www.the-village.ru / village / business / process / 227475-pomady](http://www.the-village.ru/village/business/process/227475-pomady).
3. Григоренко І.В. Блок контролю параметрів технологічного процесу виготовлення губної помади / І.В. Григоренко, М.М. Боженко // XXVI Міжнар. наук. — практ. конф.: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я, том 2. — Харків (Hryhorenko I.V. Blok kontroliu parametriv tekhnolohichnoho protsesu vyhotovlennia hubnoi pomady / I.V. Hryhorenko, M.M. Bozhenko // XXVI Mizhnar. nauk. — prakt. konf.: Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia, tom 2. — Kharkiv), 2018. — С 8.
4. Григоренко І.В. Цифровий вимірювач основних параметрів технологічного процесу виготовлення губної помади / І.В. Григоренко, М.М. Боженко // II Міжнародна науково-технічна конференція: Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування України. — Харків (Hryhorenko I.V. Tsyfrovyi vymiriuvach osnovnykh parametriv tekhnolohichnoho protsesu vyhotovlennia hubnoi pomady / I.V. Hryhorenko, M.M. Bozhenko // II Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia: Aktualni problemy avtomatyky ta prykladobuduvannia Ukrainy. — Kharkiv), 2018. — С 161, 162.
5. Григоренко І.В. Визначення взаємної кореляції параметрів технологічного процесу виготовлення губної помади / І.В. Григоренко, М.М. Боженко // XXVII Міжнар. наук. — практ. конф.: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я, том 2. — Харків (Hryhorenko I.V. Vyznachennia vzaiemnoi koreliatsii parametriv tekhnolohichnoho protsesu vyhotovlennia hubnoi pomady / I.V. Hryhorenko, M.M. Bozhenko // XXVII Mizhnar. nauk. — prakt. konf.: Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia, tom 2. — Kharkiv), 2019. — С 8.
6. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшицкий. — Москва: Наука. ФИЗМАТЛИТ (Rumshyskiy L.Z. Matematycheskaia obrabotka rezultatov eksperymenta / L.Z. Rumshyskiy. — Moskva: Nauka. FYZMATLYT), 1971. — 192 с.
7. Чинков В.М. Основи метрології та вимірювальної техніки / В.М. Чинков. — Харків: НТУ «ХПІ» (Chynkov V.M. Osnovy metrolohii ta vymiriuvalnoi tekhniky / V.M. Chynkov. — Kharkiv: NTU «KhPI»), 2005. — 524 с.
8. *Arduino Uno* — [// https:// uk.wikipedia.org/wiki/ Arduino_Uno](https://uk.wikipedia.org/wiki/Arduino_Uno) //
9. Захаров І.П. Неопределённость измерений для чайников и начальников: учеб. Пособие / И.П. Захаров. — Харьков (Zakharov I.P. Neopredelyonnost' izmerenij dlia chajnikov i nachal'nikov: ucheb. Posobie / I.P. Zakharov. — Kharkiv), 2015 — 52 с. 

Отримано / received: 28.04.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.І. Чумаковим (Україна).
Prof. V.I. Chumakov, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.