

Пуйда В.Я., Федик Ю.А.

Національний університет «Львівська політехніка»

Кафедра електронних обчислювальних машин

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ В
РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

© Пуйда В.Я., Федик Ю.А., 2019

Більшість сучасних кіберфізичних систем розробляються з передбаченням можливості виконання покладених на них задач і функцій в автоматизованому та автоматичному режимах. Для таких систем розробляються алгоритми функціонування, вхідною інформацією є не дії оператора, а фізичні параметри навколишнього середовища. Саме від швидкості, точності та надійності визначення параметрів навколишнього середовища залежить якість роботи системи. Особливо важливою задачею оперативного і точного визначення стану навколишнього середовища є для систем, функція яких полягає у визначенні потенційно небезпечних умов для людини. Сенсори передають інформацію про параметри зовнішнього середовища, наприклад: температура зовнішнього середовища, відносна вологість повітря, концентрація вуглекислого газу в повітрі, вміст інших шкідливих газів у повітрі, тиск, рівень шумового забруднення. В залежності від типів параметрів, точності та оперативності вимірювання використовуються різні типи аналогових сенсорів.

Основною проблемою використання аналогових сенсорів є необхідність високоточного перетворення аналогового сигналу, пропорційного вимірюваному параметру, у цифровий. При цьому для підвищення точності необхідно врахувати індивідуальну характеристику відповідного аналогового сенсора, а також вплив одних параметрів навколишнього середовища на результати вимірювання інших.

В статті представлено порівняння характеристик різних сенсорів якості повітря на відповідність основним вимогам кіберфізичних систем.

Ключові слова: кіберфізична система, апроксимація, сенсори температури, сенсори якості повітря, кіберфізична комп'ютерна система дисплей.

*Puyda V., Fedyk Y.*Lviv Polytechnic National University,
Computer Engineering Department

CYBERPHYSICAL SYSTEM OPERATION CONTROL PARAMRTRES IN REAL TIME

© *Puyda V., Fedyk Y. 2019*

Most modern embedded computer systems are designed with the ability to perform tasks and functions assigned to them in automated and automatic modes. For such systems, algorithms are developed, the input is not the actions of the operator, but the physical parameters of the environment. It is the speed, accuracy and reliability of the environmental parameters that determine the quality of the system. Particularly important for the rapid and accurate determination of the state of the environment is for systems whose function is to identify potentially hazardous conditions for humans. Sensors transmit information about environmental parameters such as: ambient temperature, relative humidity, carbon dioxide concentration in the air, other harmful gases in the air, pressure, noise pollution level. Depending on the types of parameters, accuracy and timing, different types of analog sensors are used.

The main problem with the use of analog sensors is the need for high-precision conversion of an analog signal proportional to the measured parameter into digital. In order to improve accuracy, it is necessary to take into account the individual characteristics of the corresponding analog sensor, as well as the influence of some environmental parameters on the measurement results of others.

The article compares the characteristics of different air quality sensors to meet the basic requirements of embedded computer systems.

Keywords: cyberphysical system, approximation, temperature sensors, air quality sensors, built-in computer display system.

Вступ. На сьогоднішній день все більше уваги вимагають питання навколишнього середовища, та можливі проблеми для людини, які можуть виникнути через неналежні умови життя чи праці. Стан навколишнього середовища визначається багатьма параметрами, вихід яких за критичні межі, можуть стати джерелом небезпеки для людини. Внаслідок цього необхідно розробити відповідну систему для контролю стану навколишнього середовища. Такі системи функціонують на основі закладених алгоритмів та вхідної інформації. Для належної роботи необхідно, щоб вхідна інформація, яка надходить на пристрій оперативно оброблялася у режимі реального часу, та була точною. Проте більшість параметрів навколишнього середовища не є незалежними, а підлягають впливу інших параметрів. Для уникнення даної проблеми необхідно, щоб технічна система мала можливість вимірювати показники, з урахуванням параметрів, які впливають на них. Такий підхід підвищує надійність і точність сучасних технічних систем.

Аналіз останніх публікацій. Теорія і практика проектування інформаційно-вимірювальних систем різного призначення базується на нових теоретичних і технологічних досягненнях в області розробки нових сенсорів та методів оброблення первинної інформації і викладена в багатьох фундаментальних публікаціях, наприклад, [1], [2]. Для досягнення необхідних параметрів при розробці сучасних технічних систем пропонуються нові підходи до аналізу інформації та прийняття рішень, наприклад, використання методів штучного інтелекту [3].

Постановка завдання. Розробити кіберфізичну систему для контролю стану навколишнього середовища у режимі реального часу на основі аналогових сенсорів. Провести порівняння характеристик різних сенсорів якості повітря, перевірити на можливість використання в системах оперативного контролю стану навколишнього середовища. На основі порівняння обрати сенсор якості повітря для використання у даній системі.

Основні матеріали досліджень. Для оперативного контролю в реальному часі різноманітних параметрів технічної системи запропоновано структуру кіберфізичної системи, див. рис.1. Зовнішній вигляд реалізованої кіберфізичної системи зображено на рис.2. Кіберфізична система представляє собою однопроцесорну структуру в на основі центрального процесора. Центральний процесор виконує основні функції по збору інформації із зовнішніх сенсорів, її подальше опрацювання і виведення результатів [4].

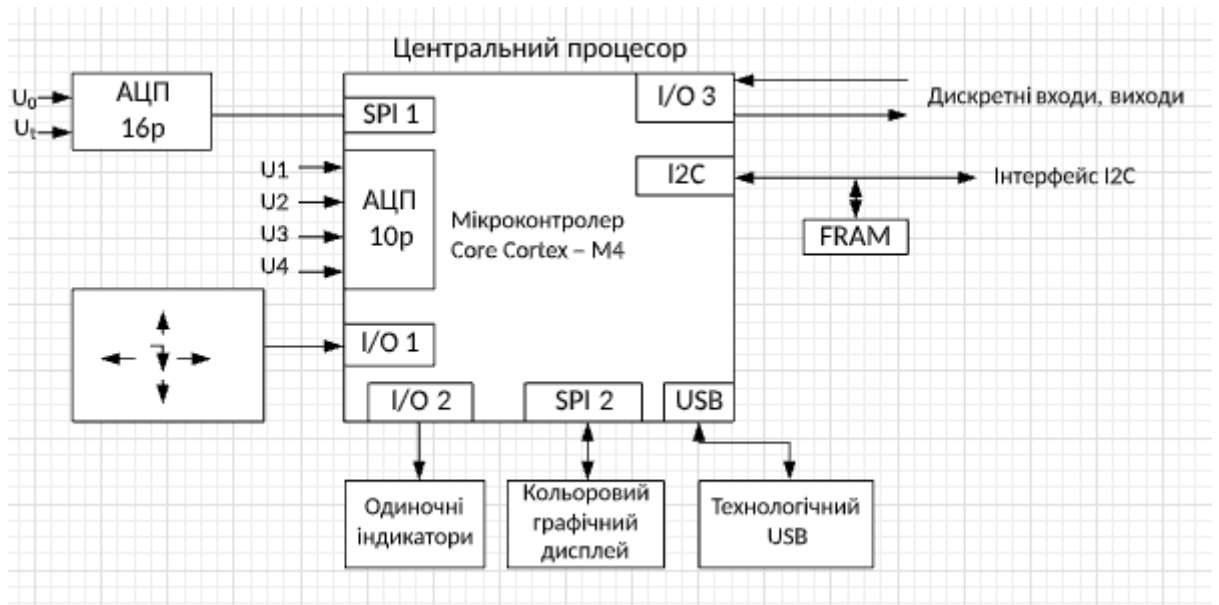


Рис. 1. Структурна схема кіберфізичної системи

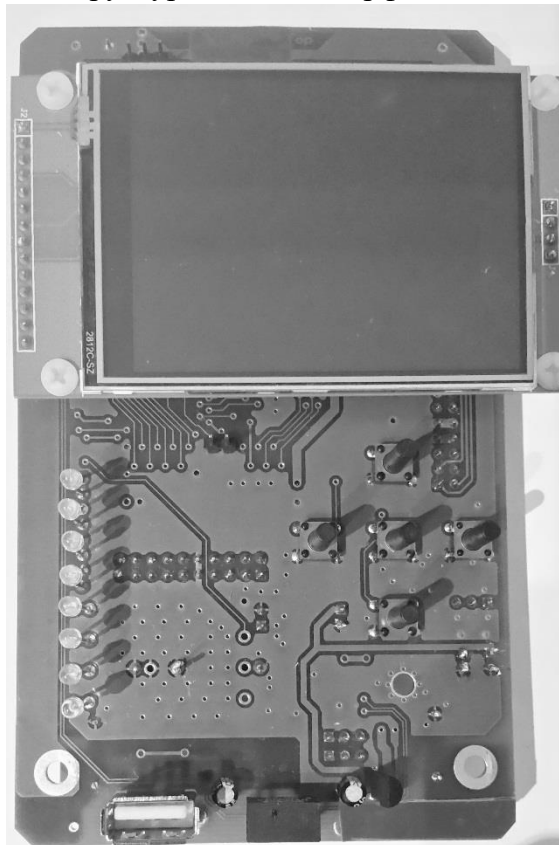


Рис. 2. Фронтальне фото вузла кіберфізичної системи з кольоровим графічним дисплеєм

Центральний процесор спроектований на базі мікроконтролера з ядром AVR з вбудованим апаратним вузлом оброблення чисел з плаваючою комою (FPU). Система команд типу RISC підтримує також операції типу DSP (оброблення сигналів) [5]. Все це значно підвищує продуктивність і забезпечує оброблення інформації від сенсорів та контроль параметрів на допустимі межі в режимі реального часу. Контролер має розвинену систему інтегрованих вузлів та інтерфейсів: синхронні SPI та I2C, паралельні I/O та USB, які використовуються для підключення аналогових сенсорів, органів керування та

відображення, конфігурації системи. Аналогові сигнали перетворюються в цифровий код з допомогою високоточного зовнішнього сигма-дельта «АЦП 16р» та інтегрованого «АЦП 10р». Вузол «АЦП 16р» використовує зовнішнє джерело опорної напруги «ДОН», що забезпечує високу точність та стабільність аналого-цифрового перетворення сигналів. Органи керування «Кнопки», «Дискретні входи» та «Дискретні виходи» використовують паралельні порти «I/O». Відображення візуальної інформації здійснюється через «Кольоровий графічний дисплей», підключений до одного з портів SPI та «Одиночні індикатори» на базі світлодіодів, підключених до паралельного порту «I/O».

Центральний мікроконтролер має інтегровану на кристалі пам'ять програм типу Flash з режимом захисту від несанкціонованого доступу та інтегровану оперативну пам'ять. Крім цього до мікроконтролера центрального процесора через інтерфейс I2C підключено швидкодіючу пам'ять типу FRAM, яка забезпечує довготривале збереження оперативної інформації при виключеному живленні. Програмування, тестування та інші технологічні операції комунікаційного процесора на стадії виробництва здійснюються через порт «Технологічний USB». Також порт USB може використовуватися для конфігурації системи в процесі функціонування та для технологічних цілей на стадії виробництва.

Первинна інформація, що поступає від сенсорів, вимагає відповідного перетворення. Як правило сенсори мають нелінійну характеристику, яка ще й залежить від зовнішніх параметрів, наприклад, від температури та вологості зовнішнього середовища, самого фізичного носія тощо. Тому в програмах центрального процесора закладено певні алгоритми оброблення вхідної інформації, визначення допустимих меж та критичних значень тощо [6], [7].

Для вибору сенсора якості повітря було проведено порівняння таких сенсорів: «MQ-7», «MQ-9», «MQ-135», див. рис. 3.



Рис. 3 Сенсори якості повітря

Як приклад розглянемо температурну корекцію характеристики сенсорів, взятих з технічної документації, див рис 4-6, для вимірювання вмісту вуглекислого газу в навколишньому середовищі.

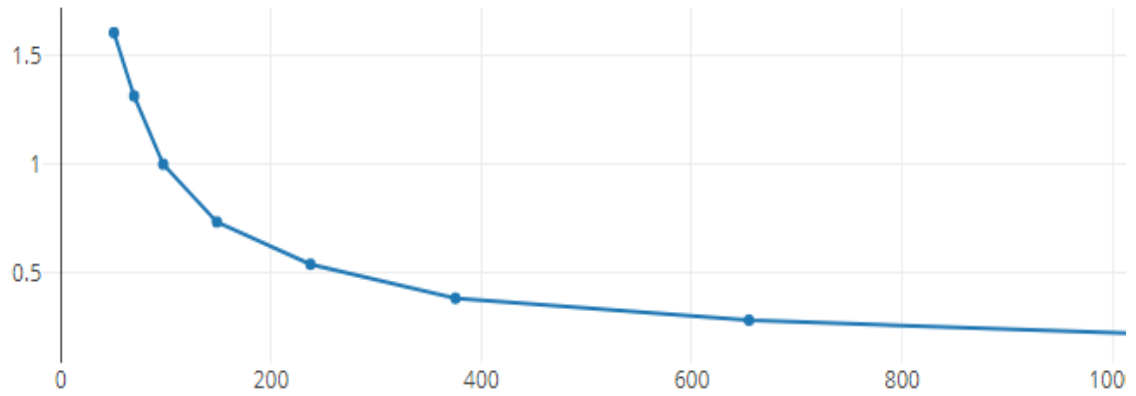


Рис. 4. Приклад характеристики сенсора якості повітря MQ-7 при температурі 20 град.С

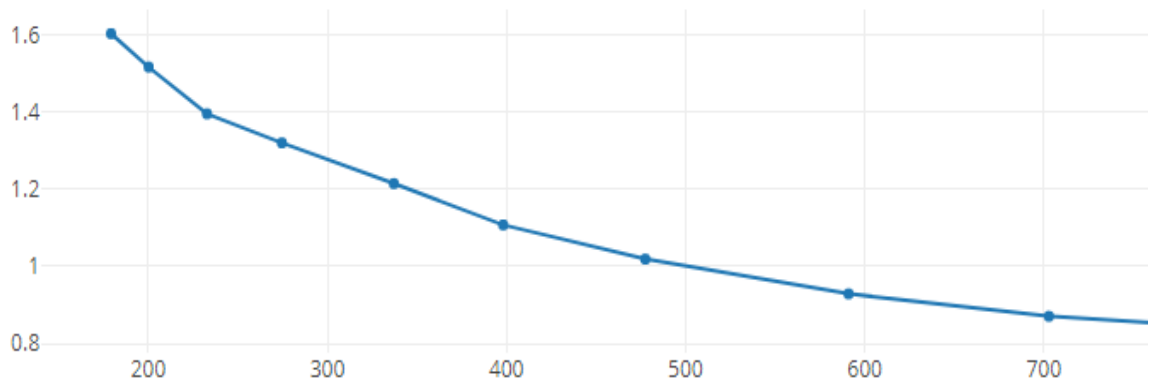


Рис. 5. Приклад характеристики сенсора якості повітря MQ-9 при температурі 20 град.С

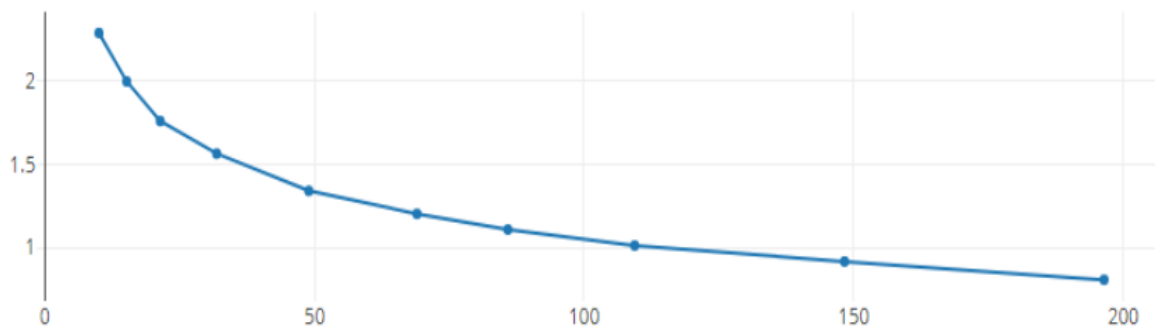


Рис. 6. Приклад характеристики сенсора якості повітря MQ-135 при температурі 20 град.С

Сенсор якості повітря побудований на вимірювальній речовини (SnO_2), яка примусово нагрівається, внаслідок чого стає чутливою до вуглекислого газу і змінює опір в залежності від його концентрації.

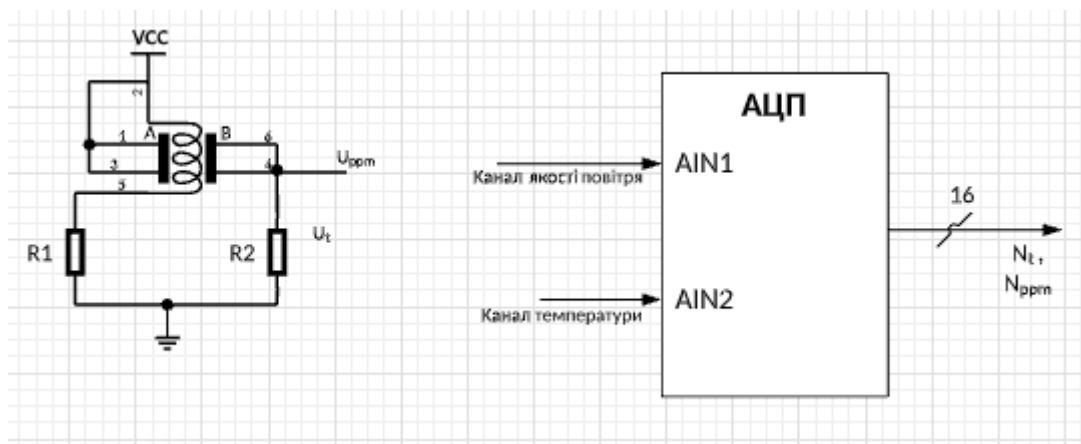


Рис. 7. Сенсор якості повітря на основі чутливої до вуглекислого газу речовини

Напруга (U_{ppm}), яка змінюється в залежності від концентрації CO_2 , подається на вхід АЦП AIN1. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) формує цифрові значення N_{ppm} з сенсора якості повітря. Якщо необхідно врахувати вплив температури зовнішнього то додатково використовується температурний сенсор. На вхід AIN2, подається напруга (U_t) з сенсора температури. АЦП формує цифрові значення N_{ppm} , N_t відповідно з сенсора якості повітря та сенсора температури. Для обчислення реального значення тиску при заданій температурі необхідно знайти аналітичний вираз функції $PPM_x = F2(N_{ppm}, N_t)$. Для цього використовуються математичні методи апроксимації функції по її табличних значеннях, які визначаються експериментально для конкретного сенсора в певному діапазоні температур. Для визначення аналітичного виразу функції $F2$ можна використати відповідні стандартні програмні засоби. У таблиці 1 показано результати використання спеціалізованого пакету DataFit, де X_1 та X_2 відповідно N_t та N_{ppm} , а на рис.8-13 зображено результати обчислення апроксимації з використанням оптимальних формул. Сенсори порівнювалися за двома параметрами: точність та час обчислення, проведеного з використанням процесора Intel Core i3-2310M з частотою 2.1 ГГц.

Таблиця 1

	Формула	Час обчислення, с	Похибка, %
MQ-9	$a+b*\ln(x1)+c*\ln(x1)^2+d*x2+e*x2^2+f*x2^3+g*x2^4+h*x2^5$	0,000412	0,16
	$a+b*\ln(x1)+c*\ln(x1)^2+d*\ln(x1)^3+e*\ln(x1)^4+f*\ln(x1)^5+g/x2+h/x2^2$	0,000663	0,45
	$a+b*\ln(x1)+c*\ln(x1)^2+d*\ln(x1)^3+e*x2+f*x2^2+g*x2^3+h*x2^4$	0,000458	0,51
MQ-7	$a+b/x1+c/x1^2+d/x1^3+e/x2+f/x2^2+g/x2^3+h/x2^4$	0,000326	0,13
	$a+b/x1+c/x1^2+d/x1^3+e*x2+f*x2^2+g*x2^3+h*x2^4$	0,000609	0,14
	$a+b*\ln(x1)+c*\ln(x1)^2+d*\ln(x1)^3+e*\ln(x1)^4+f*\ln(x1)^5+g*x2+h*x2^2$	0,000971	0,31
MQ-135	$a+b*\ln(x1)+c*\ln(x1)^2+d*x2+e*x2^2+f*x2^3+g*x2^4+h*x2^5$	0,000298	0,11
	$a+b*\ln(x1)+c*\ln(x1)^2+d*\ln(x1)^3+e*x2+f*x2^2+g*x2^3+h*x2^4$	0,000412	0,32
	$a+b/x1+c/x1^2+d/x1^3+e/x2+f/x2^2+g/x2^3+h/x2^4$	0,000545	0,18

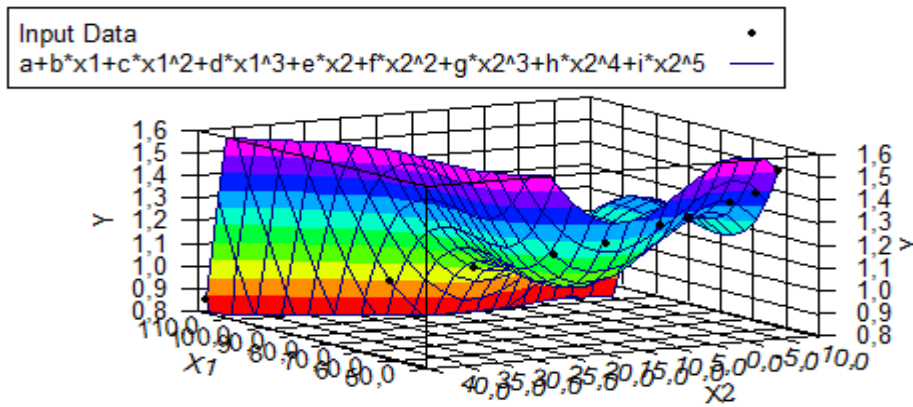


Рис. 8. Графік результату апроксимації характеристики сенсора MQ-7 з врахуванням температурної корекції

Equation:
 $8: a+b*x1+c*x1^2+d*x1^3+e*x2+f*x2^2+g*x2^3+h*x2^4+i*x2^5$

Fit Information | Data Table | Model Plot | Residual Scatter | Residual Probability | Evaluate

Residual Sum of Squares (Relative) = 1,36561369240788E-05
 Standard Error of the Estimate = 3,6954210753416E-03
 Coefficient of Multiple Determination (R²) = 0,9999668219
 Proportion of Variance Explained = 99,99668219%
 Adjusted coefficient of multiple determination (Ra²) = 0,9997013969
 Durbin-Watson statistic = 1,89107116804816

Regression Variable Results				
Variable	Value	Standard Error	t-ratio	Prob(t)
a	13,4518149665997	1,4050034056989	9,57422232	0,06625
b	-0,487966514882078	6,09839518664275E-02	-8,001556146	0,07915
c	6,44275495608408E-03	8,54979567618547E-04	7,535565995	0,08399
d	-2,81299943563295E-05	3,85562145597592E-06	-7,295839251	0,08672
e	-2,22480217905882E-02	5,47434666244962E-03	-4,064050591	0,1536
f	-7,63561185962483E-04	1,67311326492558E-04	-4,563714854	0,13733
g	1,33438226849688E-04	2,24747965538639E-05	5,937238476	0,10623
h	-2,61161658428675E-06	8,99161293496232E-07	-2,9045029	0,21109
i	1,77716071647698E-08	1,34988417923506E-08	1,316528295	0,41355

Рис. 9. Результати апроксимації характеристики сенсора MQ-7 з врахуванням температурної корекції

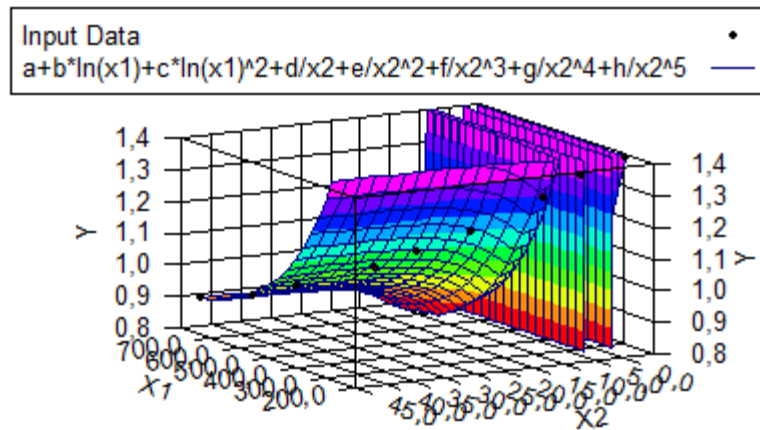


Рис. 10. Графік результату апроксимації характеристики сенсора MQ-9 з врахуванням температурної корекції

Equation:
 5: $a+b\ln(x_1)+c\ln(x_1)^2+d/x_2+e/x_2^2+f/x_2^3+g/x_2^4+h/x_2^5$

Fit Information | Data Table | Model Plot | Residual Scatter | Residual Probability | Evaluate

Residual Sum of Squares (Absolute) = 8,63696037745213E-07				
Residual Sum of Squares (Relative) = 8,63696037745213E-07				
Standard Error of the Estimate = 9,29352483046779E-04				
Coefficient of Multiple Determination (R ²) = 0,9999967626				
Proportion of Variance Explained = 99,99967626%				
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra ²) = 0,9999741011				
Durbin-Watson statistic = 3,06222294796783				
Regression Variable Results				
Variable	Value	Standard Error	t-ratio	Prob(t)
a	26,6797666711668	2,15724327720309	12,36752802	0,05136
b	-7,59992594878386	0,652589104118747	-11,64580576	0,05453
c	0,559505729625614	4,96061129242986E-02	11,27896738	0,0563
d	1,0753491002784	0,678388749808816	1,58515173	0,35829
e	-26,5987076197052	5,72811185959131	-4,643538442	0,13504
f	42,552972975085	8,53582884888749	4,985218627	0,12603
g	464,007363946426	129,599758207706	3,580310414	0,17339
h	-904,086787679296	242,3545553373	-3,73041649	0,16674

Рис. 11. Результати апроксимації характеристики сенсора MQ-9 з врахуванням температурної корекції

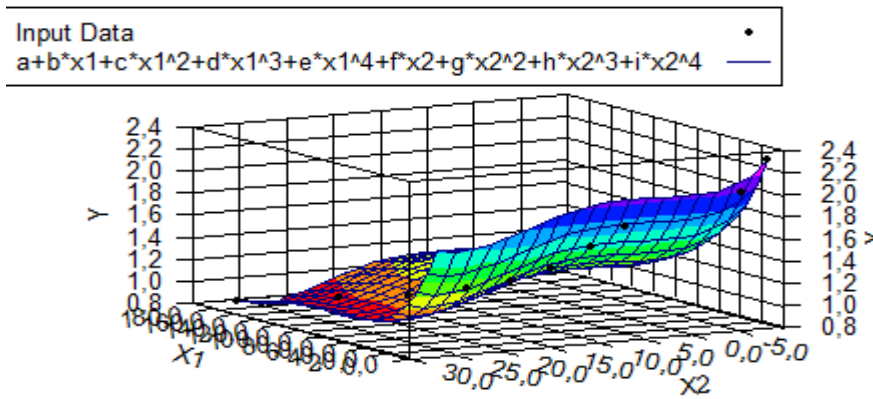


Рис. 12. Графік результату апроксимації характеристики сенсора MQ-135 з врахуванням температурної корекції

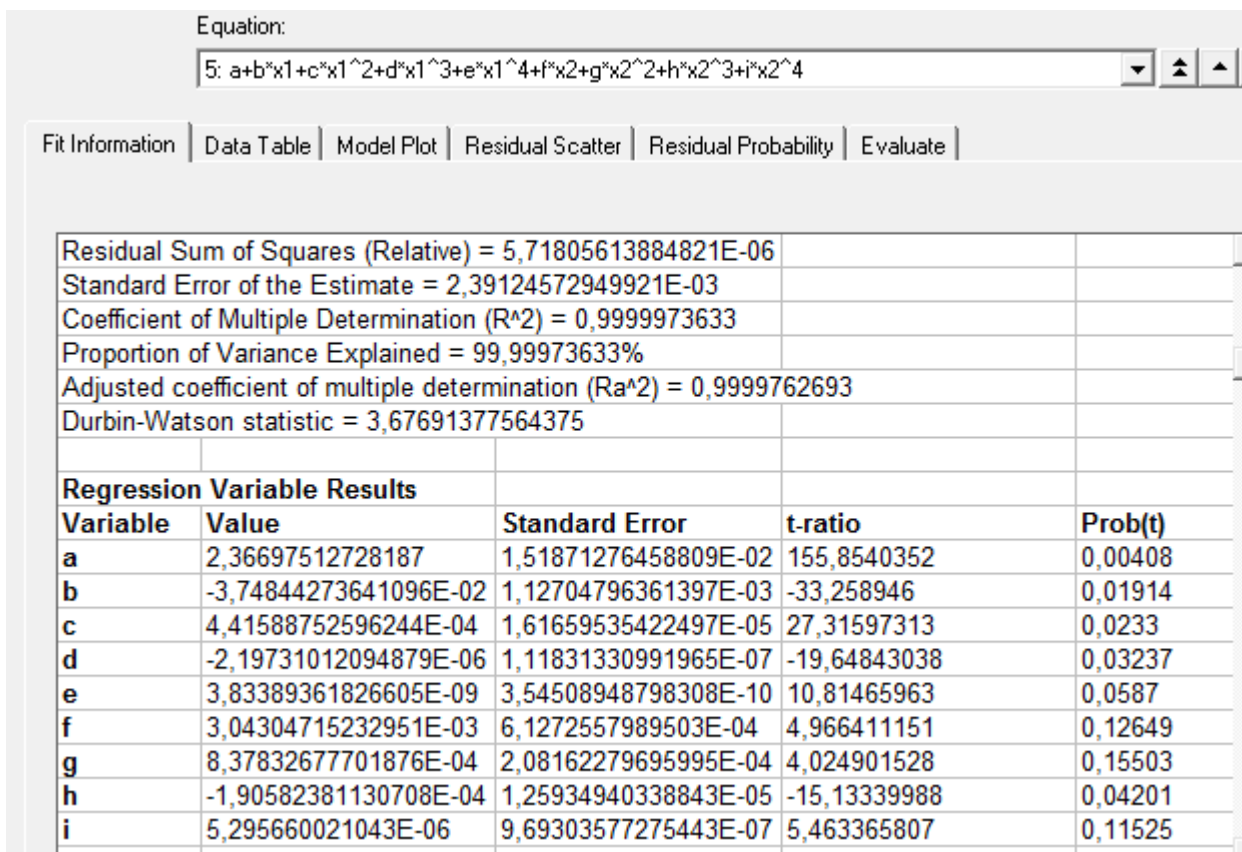


Рис. 13. Результати апроксимації характеристики сенсора MQ-135 з врахуванням температурної корекції

Отримані аналітичні вирази використовуються для визначення реального значення вмісту вуглекислого газу у повітрі з врахуванням температурної корекції. Це суттєво підвищує точність вимірювання PPMx і відповідно підвищує надійність підсистеми оперативного контролю параметрів. По результатам апроксимації для заданої кіберфізичної системи було обрано сенсор якості повітря MQ-135, адже точність вимірювання для нього становить 99,89%, що є найкращим результатом.

Висновки. Запропонована структура кіберфізичної системи для оперативного контролю в реальному часі різноманітних параметрів зовнішнього середовища базується на

центральному процесорі. Центральний процесор реалізується на мікроконтролері ATmega з ядром AVR. В залежності від призначення технічної системи можуть використовуватися необхідні сенсори, а функціонування може бути переорієнтоване на різні задачі шляхом зміни алгоритмів центрального процесора без зміни апаратної платформи. Запропонована структура реально реалізована та використовується у відповідних технічних системах.

*1. V. Babak. Theoretical Fundamentals of information measurement systems. Second edition, revised and supplemented. Textbook. Edited by Member of the National Academy of science of Ukraine. Kyiv, 2017, 293-325. 2. Applied Measurement System / Edited by Md. Zachurul Had. – In Tech, USA, 2012. 3. Solar-Powered Internet of Things (IoT) Device Kit User Guide, Cypress Semiconductor, 198 Champion Court, San Jose, CA 95134-1709, Doc. No. 002-00297 Rev. *B. 4. Puyda V.Ya. Special processor of the system of operative control of parameters in real time. Scientific Journal "Computer Systems and Networks", 2019, 5905, p.111-116. 5. AVR [Electronic resource] / wiki. – Access mode: <https://en.wikipedia.org/wiki/AVR>. 6. Melnik AO Cyberphysical systems: problems of creation and directions of development // Bulletin of Lviv Polytechnic National University "Computer Systems and Networks", 2014, №806. - P.154-161. 7. Melnik AO Integration of cyberphysical system levels // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Computer systems and networks. - 2015. - № 830. - P. 61-67.*