

**Стаценко Д.В.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Злотенко Б.М.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Демішонкова С. А.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Стаценко В.В.**

Київський національний університет технологій та дизайну

## ВИКОРИСТАННЯ I2C У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУРИ ПРИМІЩЕНЬ

*У статті розглядаються імітаційні моделі комп'ютерних систем моніторингу температури у приміщеннях. Проведено порівняльний аналіз цих комп'ютерних систем. Наголошено, що використання пристроїв для вимірювання температури поширене серед різноманітних галузей людської діяльності. Необхідність встановлення великої кількості датчиків призводить до зростання складності комп'ютерної системи моніторингу. Важливу роль у розробці систем відіграють протоколи з'єднання датчиків з мікроконтролером.*

*У аналізі останніх публікацій та досліджень наведена інформація про широке застосування протоколу I2C у різних галузях для вирішення практичних завдань та необхідність подальшого вдосконалення систем з використанням цього протоколу.*

*Представлені дві імітаційні моделі комп'ютерних систем моніторингу температури в приміщенні на базі класичного з'єднання так і на базі I2C. У імітаційній моделі на базі стандартного використано: плата Arduino Uno на базі мікроконтролера Atmega328p, датчики температури LM35 та мультиплексор 74HC4051D. У імітаційній моделі на базі I2C протоколу використано: плата Arduino Uno та датчики температури TC74A0-5.0VAT. Наведено інформацію про роботу протоколу I2C, який широко застосовується для підключення низькошвидкісної периферії до мікропроцесорів та мікроконтролерів. З метою порівняння, використано однакову кількість датчиків в обох комп'ютерних системах для проведення рівнозначного аналізу результатів моделювання. Розглянуті параметри: кількість можливих з'єднань, складність конструкції, використання компактного програмного коду, частота тактового сигналу та вартість комп'ютерних систем моніторингу температури приміщення.*

*У висновках подано результати проведеного аналізу розглянутих імітаційних моделей комп'ютерної системи моніторингу температури приміщень. Наведено переваги та недоліки систем з I2C протоколом.*

**Ключові слова:** імітаційна модель, комп'ютерна системи, I2C, датчик температури, Arduino UNO, мікроконтролер.

**Постановка проблеми.** Датчики дозволяють отримувати, реєструвати, обробляти та надавати інформацію про стан систем до яких вони підключені. На сьогодні, вимірювання температури поширене серед різноманітних галузей людської діяльності, відповідно використання термодатчиків стало звичним явищем. Термодатчики, різних типів, застосовуються у автоматизації технологічних процесів, проведенні наукових досліджень, промисловості, сільському господарстві, медицині, побуті тощо. Застосування термодатчиків дає можливість знизити вірогідність аварійних ситуацій та забезпечити роботоспроможність

дорогого виробничого обладнання. Удосконалення та розвиток моделей сучасних датчиків призводить до підвищення ефективності вимірювань. Надійність та ефективність різноманітних технічних пристроїв, зокрема датчиків, є визначальними факторами у будь-якій комп'ютерній системі.

В більшості випадків, термодатчики використовуються у пристроях для одночасного дистанційного вимірювання та контролю температури в різних точках об'єкта моніторингу. Установка досить великої кількості точок вимірювання температури на об'єктах моніторингу пов'язана з необхідністю своєчасного визначення осередку

підвищення або зниження температури та прийняття відповідних контрзаходів.

Необхідність встановлення великої кількості датчиків призводить до зростання складності комп'ютерної системи моніторингу даного об'єкту. Що у свою чергу, призведе до підвищення витрат необхідних для побудови такої комп'ютерної системи. При цьому, готові до придбання рішення не завжди задовольняють всім вимогам, або їх вартість перевищують допустимі межі.

Один з варіантів вирішення такої проблеми, є використання мікроконтролерів сімейства Arduino та під'єднаних до них датчиків, а також елементів візуалізації обробленої інформації для побудови комп'ютерної системи моніторингу об'єкту. Відповідно до чого, важливу роль у створенні такої системи будуть відігравати протоколи з'єднання датчиків з мікроконтролером. В залежності від яких будуть змінюватися технічні параметри комп'ютерної системи моніторингу об'єкту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні, для підключення датчиків до мікроконтролерів, використовуються різні протоколи з'єднання. Огляд публікацій за останні п'ять років показав широке використання протоколу I2C підключення в різних галузях людської діяльності.

У статті [1] розглянуто питання розробки методу для роботи з датчиком використовуючи I2C з метою підключення додаткових датчиків для стабілізації польоту БПЛА.

В роботі [2] розглянуто використання протоколу зв'язку I2C. Досліджено роботу мікросхеми 24LC256 з послідовною пам'яттю EEPROM, яка з'єднана за допомогою даного протоколу з датчиком температури TC74.

У дослідженні [3] розглянуто проблеми пов'язані з доступністю шини I2C для Cube Satellites та робототехнічних додатків. Пропонується використовувати програмовану користувачем вентилярну матрицю в якості альтернативи системам мікроконтролерів, оскільки вони здатні відновлюватися після несправностей шини шляхом часткової реконфігурації без переривання місії, а також можливе резервування потрібного проводу, оскільки доступно більше контактів.

Патент [4] пропонує пристрій та спосіб розширення діапазону адрес I2C або I2C-сумісної шини. Мета дослідження полягає у використанні інтегральної схеми в якості «Slave» у шині I2C, що надасть більшої гнучкості для призначення адресів під'єднаним «Slave»-пристроєм.

У статті [5] розглянуто спрощений підхід до блокування тактової лінії I2C за допомогою логіч-

них елементів, щоб захистити інформацію, що проходить через лінії даних.

На основі аналізу останніх досліджень і публікацій, в даній роботі, основну увагу присвячено підключенню датчиків до мікроконтролерів за допомогою протоколу I2C.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є порівняльний аналіз використання протоколу I2C та традиційного підключення датчиків температури до мікроконтролера комп'ютерних систем дистанційного вимірювання температури та моніторингу технічного стану об'єкту.

**Виклад основного матеріалу.** Розробка та створення ефективної системи моніторингу температури об'єкта передбачає використання достатньо великої кількості датчиків під'єднаних до комп'ютерної системи, яка буде виконувати функції обробки, аналізу та передачі даних отриманих з датчиків.

В роботі розглянуто декілька моделей підключення датчиків до мікроконтролера. Аналіз моделей проведено за допомогою пакету програм для автоматизованого проектування електронних схем Proteus [6].

На рис. 1 наведено імітаційну модель комп'ютерної системи призначеної для визначення температури у приміщенні.

У даній моделі задіяні наступні елементи: плата Arduino Uno на базі мікроконтролера Atmega328p [7], датчики температури LM35 та Virtual Terminal для виводу обробленої інформації з датчиків на консоль персонального комп'ютера.

Датчик LM35 є інтегральною схемою призначеною для вимірювання температури [8]. LM35 є недорогою, надійною та досить точною мікросхемою (похибка вимірювання становить близько  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ).

Позитивні якості датчика LM35: лінійна залежність вихідного сигналу (температура/напруга), низький вихідний опір, вбудована схема калібрування. Датчик може працювати в діапазоні від  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $150^{\circ}\text{C}$ . Аналоговий сигнал на виході прямо пропорційний до зміни температури в градусах Цельсія, на кожен градус припадає 10мВ. Струм споживання датчика становить близько 60 мкА, саморозігрів LM35 становить  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Головний недолік даного підключення (рис. 1) – можливість під'єднання невеликої кількості аналогових пристроїв. Плата Arduino Uno має лише п'ять аналогових виходів. Дане технічне обмеження призводить до того, що комп'ютерна система моніторингу температури в приміщенні може працювати лише у певних



зростає кількість з'єднань та додаткових елементів, необхідних для покращення ефективності роботи комп'ютерної системи моніторингу.

Один з варіантів вирішення цієї проблеми, є використання датчиків, які можна підключити за допомогою протоколу з'єднання I2C. Даний інтерфейс розроблений з метою простого зв'язку між компонентами на одній друкованій платі. Шина I2C використовує дві двонаправлені лінії для передачі та прийому інформації, підключені пристрої при обміні даними використовують загальну тактову лінію [10].

I2C широко застосовується для підключення низькошвидкісної периферії до мікропроцесорів та мікроконтролерів. Даний інтерфейс підтримує різні комбінації підключення ведучих та ведених пристроїв.

Інтерфейс I2C використовує лише послідовні лінії даних, тактової частоти та загальну землю для всіх пристроїв. Кожен I2C пристрій повинен мати два виводи:

1) SDA – для прийому та передачі даних від ведучого до веденого і навпаки.

2) SCL – передачі тактового сигналу, який генерується ведучим пристроєм.

Передача біт, у інтерфейсі I2C, синхронізується з прийомом за допомогою тактового сигналу, який спільно використовується ведучим і веденим. Максимальна кількість підключених I2C пристроїв може досягати 127 але 16 адрес, з них, зарезервовані. Максимальна довжина шини залежить від ємності кабелю та швидкості передачі. При швидкості 100 кбіт/с довжина шини I2C може становити до 1 м та 10 м при швидкості 10 кбіт/с.

Дані, які необхідно передати по шині I2C, розбиваються на кадри і передаються у форматі повідомлень, які містять: адресний кадр з двійковою адресою пристрою; біт читання/запису; біти підтвердження.

Для повідомлення пристрою про те, що дані надсилаються саме йому, використовується адресація. Адресний кадр завжди відправляється після процедури початку передачі. Ведучий надсилає адресу всім підключеним до нього пристроям, далі всі під'єднані пристрої порівнюють отриману адресу зі своєю і, якщо вони співпадають, відправляють ведучому пристрою біт підтвердження низького рівня. Якщо адреса не збігається, пристрій не виконує жодних дій і лінія SDA залишається у високому стані. В кінці адресного кадру відправляється біт, який визначає операцію читання/запису.

Після кожного кадру у повідомленні на шині очікується біт підтвердження. Якщо він був успішно

отриманий надсилається перший кадр даних. Після передачі всіх кадрів даних ведучий проводить процедуру закінчення передачі. Для цього ведучий переводить лінію SDA у високий стан, при цьому SCL залишається у високому стані.

Тактова частота завжди генерується ведучим та синхронізує обмін даними між ведучим та веденим. Будь-який I2C пристрій на шині може утримувати лінію SCL в низькому стані необмежений час. Дана процедура, затримка тактового сигналу, використовується у випадках, коли ведений пристрій не може відразу відправити дані у відповідь і знижує швидкість шини.

Технічний опис та регістри I2C у документації різних мікросхем можуть відрізнятися залежно від виробника. Назви регістрів та їх описи можуть бути іншими, однак їх призначення та використання є загальним для всіх пристроїв. Програмна реалізація I2C варіюється залежно від завдання.

На рис. 3 показана імітаційна модель побудована на основі цього методу. В даній схемі використано цифровий датчик температури TC74A0-5.0VAT [11].

Дані про температуру від вбудованого термочутливого елемента перетворюються на 8 бітне цифрове слово. Зв'язок з TC74 здійснюється через простий 2-провідний послідовний порт із сумісністю з I2C. Біт SHDN у регістрі CONFIG можна використовувати для активації режиму очікування з низьким споживанням енергії. Роздільна здатність температури 1 °C. Номінальне значення швидкості перетворення 8 вибірок/с. Енергоспоживання всього 200мкА. Мінімальна вимірювана температура, -40°C. Максимальна температура, що вимірюється, +125°C. Точність, 2 %. У таблиці 1 наведено статичні характеристики даного датчика.

Температурний діапазон датчика TC74 наближений до розглянутого, у імітаційній моделі на рис. 1 та рис. 2, датчика температури LM35.

З метою порівняння, для моделювання було обрано однакову кількість датчиків (рис. 2 та рис. 3), а також єдина модель плати Arduino UNO. Дана схема має ряд переваг перед вищезазначеними.

У імітаційній моделі, яка використовує інтерфейс I2C, використовується два аналогових виводи (SDA, SCL), у той час, як у схемі підключеної за допомогою стандартних з'єднань використовується один аналоговий (A0) та три цифрових виводи плати Arduino UNO. Також використовуються всі виводи мультиплектора 74HC4051D, що збільшує та ускладнює кількість зв'язків. Даний фактор негативно впливає, як на конструкцію комп'ютерної системи моніторингу, так і на код

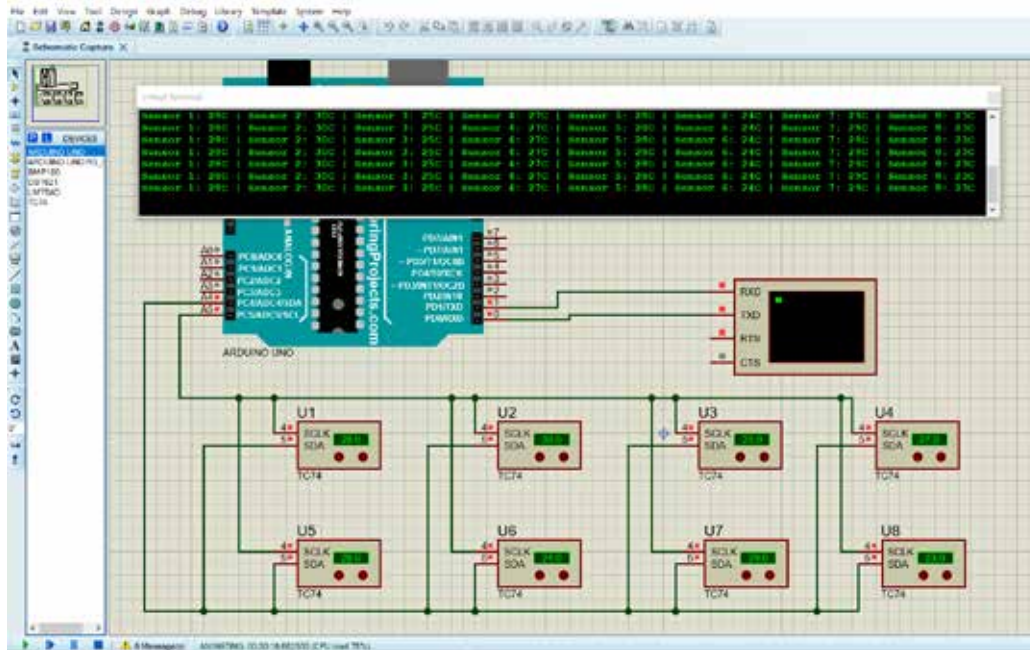


Рис. 3. Імітаційна модель комп'ютерної системи моніторингу з інтерфейсом I2C

Таблиця 1

Статичні характеристики TC74A0-5.0VAT

Позначення	Параметр	Одиниці вимірювання	Числове значення
$f_{SMB}$	Синхросигнал (тактовий сигнал)	кГц	100
$t_{LOW}$	Тривалість напівперіоду «низького» SCL	мкс	4,7
$t_{HIGH}$	Тривалість напівперіоду «високого» SCL	мкс	4
$t_R$	Фронт сигналів SCL та SDA	нс	1000
$t_F$	Спад сигналів SCL та SDA	нс	300
$t_{SU(START)}$	Час встановлення сигналів	мкс	4
$t_{H(START)}$	Час утримання сигналів на початку або повторі передачі	мкс	4
$t_{SU-DATA}$	Час встановлення даних	нс	1000
$t_{H-DATA}$	Час утримання даних	нс	1250
$t_{SU(STOP)}$	Час встановлення сигналів для закінчення передачі	мкс	4
$t_{IDLE}$	Час після закінчення, перед початком нової передачі	мкс	4,7

програми необхідний для реалізації послідовності команд пов'язаних з моніторингом. Для збільшення числа датчиків під'єднаних до плати Arduino UNO (рис. 2), необхідно використати додаткові мультиплектори. Якщо, для цього, використовувати плати 74HC4051D, то максимальна кількість підключених датчиків збільшиться до 32, в порівнянні з протоколом I2C, в якому можливе підключення 111 пристроїв одночасно використовуючи таку ж саму плату Arduino UNO.

Тактовий сигнал імітаційної моделі з протоколом I2C в стандартному режимі буде становити 100 кГц, або 10 мкс. Для імітаційної моделі зі стандартним з'єднанням максимальна частота зчитування приблизно дорівнює 10 кГц, або 100 мкс. Використання плати мультиплектора 74HC4051D,

для збільшення кількості під'єднаних датчиків, має незначний вплив на час зчитування сигналу з аналогового пристрою, відповідно до технічної специфікації [9] затримка сигналу та час включення становлять приблизно 400 нс.

Наступна величина, яку необхідно розглянути – вартість використаних елементів у обох імітаційних моделях дистанційного моніторингу приміщення. Розглянута вартість елементів: LM35 – 57,5 грн.; 74HC4051D – 10 грн.; TC74A0-5.0VAT – 114,5 грн.. Ціни вказані відповідно до магазинів України станом на вересень 2022 року. Відповідно до цього вартість обладнання необхідного для моніторингу та передачі даних у першому випадку (рис. 2) складає 470 грн. без врахування плати Arduino UNO. У другому

варіанті (рис. 3) вартість обладнання бути дорівнювати 916 грн. при таких самих умовах.

**Висновки.** Проведений аналіз комп'ютерних систем імітаційних моделей моніторингу температури приміщень на базі стандартного з'єднання та на базі протоколу I2C показав наступні результати. Використання протоколу I2C має наступні переваги: менша кількість зв'язків, проста для реалізації конструкція, компактність та простота програмного

коду, можливість під'єднати до однієї і тієї ж плати мікроконтролера більшу кількість датчиків, але не більше 111. Також, частота тактового сигналу в 10 разів більша в порівнянні зі стандартним з'єднанням. Недоліки такої комп'ютерної системи наступні: вартість приладів з інтерфейсом I2C на 51,3% більша ніж при стандартному підключенні, пошкодження навіть одного з'єднання I2C призведе до виходу з ладу всієї комп'ютерної системи моніторингу.

#### Список літератури:

1. Деркач М.В., Матюк Д.С. Альтернативний метод для роботи з датчиком MPU-6050 по шині даних I<sup>2</sup>C. Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. Харків: НТУ "ХПІ", 2020.
2. Ward H. Programming Arduino Projects with the PIC Microcontroller. *Using the I2C Protocol* / H. Ward, Apress Berkeley, CA, 2022, pp. 451-483.
3. Trujillo L., Saotome O., Öberg J. Proceedings of the 7th Brazilian Technology Symposium (BTSym'21). / Y. Iano, O. Saotome, G. L. K. Vásquez, C. C. Pezzuto, R. Arthur, G. G. de Oliveira. Springer Cham, 2022. pp. 383-395.
4. Apparatus and method for increased address range of an I2C or I2C compatible bus: Patent: US8543740B2 USA Appl. No 13/010481; filed 20.10.2011; date of patent 24.09.2013
5. Rekha S., Balu R., Dilipkumar N., Crocier A., Mohankumar N. International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems. *Logically Locked I2C Protocol for Improved Security* / V. Bindhu, J. M. R. S. Tavares, A.A. Boulogeorgos, C. Vuppapapati. Springer Singapore, 2020. pp. 707-716.
6. PCB Design and Circuit Simulator Software – Proteus. URL: <https://www.labcenter.com/>
7. Arduino UNO R3. Product Reference Manual. URL: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>
8. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
9. CMOS Digital Integrated Circuits 74HC4051D, 74HC4052D. URL: [https://www.mouser.com/datasheet/2/408/74HC4051D\\_datasheet\\_en\\_20201203-959201.pdf](https://www.mouser.com/datasheet/2/408/74HC4051D_datasheet_en_20201203-959201.pdf)
10. UM10204 I2C-bus specification and user manual. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
11. TC74 Tiny Serial Digital Thermal Sensor. URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21462D.pdf>

**Statsenko D.V., Zlotenko B.M., Demishonkova S.A., Statsenko V.V.**

#### **USING I2C IN COMPUTER SYSTEMS OF INDOOR TEMPERATURE MONITORING**

*The article considers simulation models of computer systems for temperature monitoring in rooms. A comparative analysis of these computer systems was carried out. It is emphasized that the use of devices for measuring temperature is widespread among various fields of human activity. The need to install a large number of sensors leads to an increase in the complexity of the computer monitoring system. Protocols for connecting sensors to a microcontroller play an important role in system development.*

*In the analysis of the latest publications and studies, information is given about the wide application of the I2C protocol in various fields for solving practical tasks and the need for further improvement of systems using this protocol.*

*Two simulation models of indoor temperature monitoring computer systems based on classical connection and I2C are presented. The simulation model based on the standard protocol used: Arduino Uno board based on Atmega328p microcontroller, LM35 temperature sensors and 74HC4051D multiplexer. The simulation model based on the I2C protocol uses: Arduino Uno board and temperature sensors TC74A0-5.0VAT. Information is given on the operation of the I2C protocol, which is widely used to connect low-speed peripherals to microprocessors and microcontrollers. For the purpose of comparison, the same number of sensors was used in both computer systems to conduct an equivalent analysis of the simulation results. The parameters considered are the number of possible connections, the complexity of the design, the use of compact software code, the clock frequency, and the cost of indoor temperature monitoring computer systems.*

*The results of the analysis of the considered simulation models of the computer system for monitoring room temperature are presented in the conclusions. The advantages and disadvantages of systems with the I2C protocol are given.*

**Key words:** simulation model, computer systems, I2C, temperature sensor, Arduino UNO, microcontroller.