

УДК 536.5

DOI: 10.18372/0370-2197.2(91).15534

П. І. САРАБЄЄВ, П. Л. НОСКО, О. В. БАШТА, В. Б. МЕЛЬНИК,  
О. В. ГЕРАСИМОВА

Національний авіаційний університет, Україна

## РОЗРОБКА АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ У СКЛАДСЬКИХ ПРИМІЩЕННЯХ МУЛЬТИТЕМПЕРАТУРНОГО ТИПУ КЛАСУ «С»

Для складських приміщень мультитемпературного типу класу «С» запропонована автоматична система керування температурою централізованого типу на аналоговій шині, яка має високі технічні характеристики, а саме: швидкодія - час стояння на точці менше 0,1 секунди; системна мультиплікативна похибка не перевищує 0,15%, а адитивна приведена похибка дорівнює 0,05%; завадозахищеність знижена з 30% похибки майже до нуля. Застосування таких систем є економічно рентабельним та дозволяє для невеликих приміщень значно розширити ринок складської продукції.

**Ключові слова:** система централізованого типу, складське приміщення, температура, канал вимірювання, терморегулятор, температурний режим, аналогова шина, швидкодія, похибка, завадозахищеність.

**Вступ.** Якість товару залежить від його умов зберігання. Умови зберігання – це середовище, в якому зберігається продукція. Сюди входять важливі параметри такі як температура, вологість, світло і інші. Тому, для підтримання належної якості продукції необхідно дотримуватися правильного режиму температури та вологості.

Правильне зберігання продукції захищає її від псування. Щоб захистити продукцію від псування та продовжити термін її зберігання, використовують різні методи, наприклад консервування, адаптація різних показників до режиму зберігання клімату тощо. Для цього на складі зберігання виробів повинна бути надійна система вентиляції, яка звертає увагу на ретельне очищення, якісні датчики та сучасну систему управління умовами зберігання всередині. Як правило, вся продукція зберігається на складах, де їх слід розміщувати на полицях відповідно до типу, розміру та кількості. Всі препарати повинні бути поміщені на склад згідно з умовами їх отримання, щоб матеріали, які раніше були відправлені на склад, продовжували надходити споживачеві [1,2].

Проведено аналіз сучасних автоматичних систем керування температурою показує, що існує два типи систем – централізованого і децентралізованого типу (рис. 1. і рис. 2. відповідно).

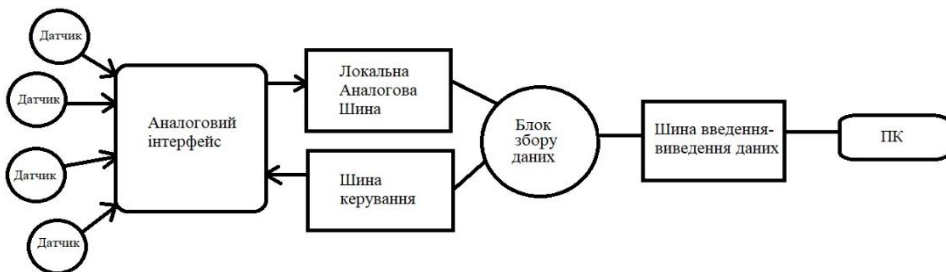


Рис. 1. Система централізованого типу.

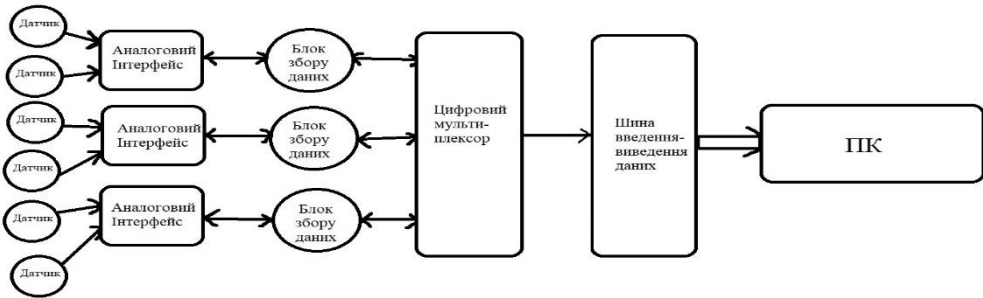


Рис.2. Система децентралізованого типу.

Кожна із систем має свої переваги та недоліки. Децентралізований тип має цифрову шину, яка ліпше аналогової, але, у цьому випадку, для кожного датчика повинен існувати свій вимірювальний канал разом з цифровим інтерфейсом, на відміну з централізованою системою. Проведена попередня порівняння оцінка вартості двох систем для приміщень класу «С» показує, що вартість децентралізованої системи, за рахунок використання значної кількості датчиків, інтерфейсів тощо, на 40-50% вище за централізованої автоматичної системи керування температурою. У такому випадку доцільно використовувати автоматизовану систему централізованого типу з аналоговою шиною, в якій аналогова струмова петля використовується для передачі аналогового сигналу по парі проводів в лабораторному устаткуванні та в системах управління [3].

Разом з тим, застосування централізованих систем з аналоговою шиною має наступні відомі недоліки, які потребують усунення при розробці автоматичних систем керування для невеликих складських приміщень. Це конфлікт між швидкістю і точністю, складність роботи з віддаленими об'єктами та завадозахищеність.

**Метою роботи** є розробка ефективної автоматичної системи керування температурою у складських приміщеннях мультитемпературного типу та класу «С».

**Матеріали досліджень.** У системі централізованого типу головним елементом є аналоговий інтерфейс. Аналоговий інтерфейс на сьогодні - це діапазон 4-20 мА. Він працює виключно в режимі «точка-на-точку». Тобто для кожного датчика потрібен свій перетворювач (в районі датчика) сигналів до 4-20 мА.

Розроблено схему роботи автоматичного терморегулятора, яка дозволяє наглядно продемонструвати роботу системи типу «точка-на-точку». Створений алгоритм роботи автоматичного терморегулятора, описано характеристики елементів та принцип його дії (рис. 3) [4].

При цьому, Програмне забезпечення для вимірювання температури створено в IDE Arduino, дані з системи регулювання температури передаються через модулі взаємодії. Arduino зчитує температуру з I2C-датчика температури TC74A0-5.0VAT. Якщо значення поточної температури більше або дорівнює заданій температурі, активується короткочасний сигнал тривоги та вентилятор. Коли температура опуститься нижче встановленої точки, вентилятор вимикається. На РК-дисплеї відображаються поточна температура та задана температура.

Наявність функції керування в пристроях передбачає можливість реалізації трьох типів регулювання: П-, ПІ- і ПІД регулювання. Наглядно роботу регуляторів можна побачити на рис.4.

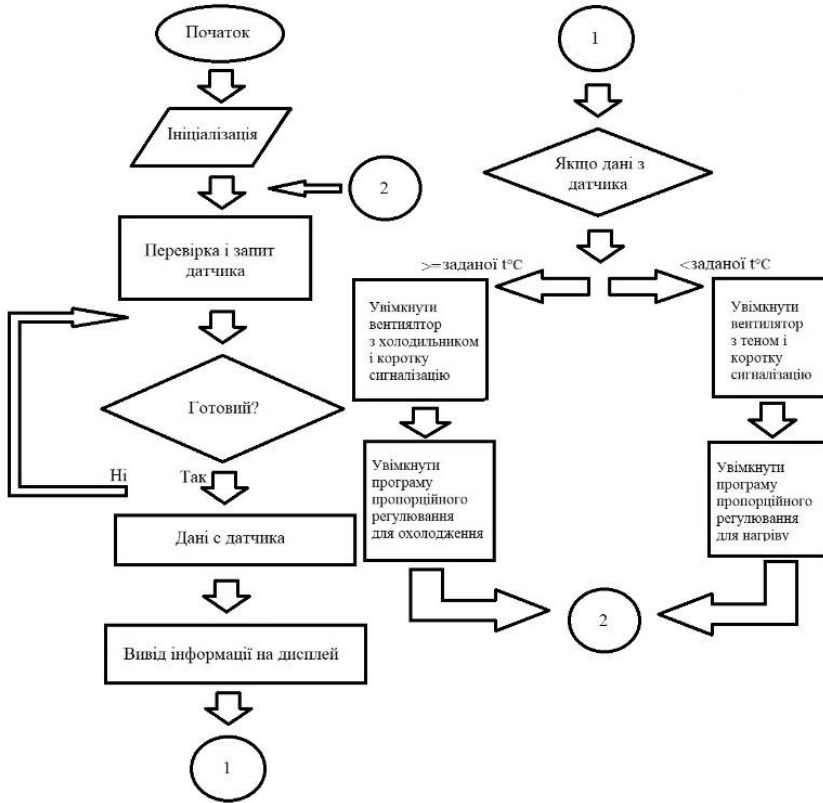


Рис. 3. Алгоритм роботи програми автоматичного терморегулятора

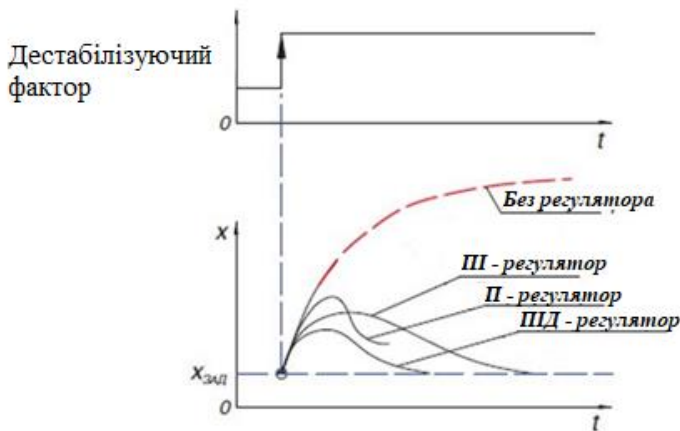


Рис. 4. П-, ПІ-, ПІД-регулювання:  $X_{\text{зад}}$  – задана точка (в нашому випадку – уставка температури на регуляторі),  $t$  – час

Аналіз графіків рис. 4 показує, що ПІД – регулятор в даному випадку має найкращі показники, а саме: точність і швидкість, у порівнянні з іншими регуляторами. Вихідна його потужність відповідає сумі трьох компонентів: пропорційної, інтегральної та диференціальної. Чим більший коефіцієнт пропорційності, тим менша вихідна потужність для однієї і тієї ж помилки регулювання, чим довше константа часу інтеграції, тим повільніше накопичується інтегральний компонент і чим довше константа часу диференціації, тим сильніше реакція системи на виникаючі впливи.

Як показує практика ПД-регулятор використовується в інерційних системах з відносно низькою перешкодою вимірювального каналу. Він має: швидкий доступ до режиму, точне підтримання заданої температури та швидка реакція на впливи. Саме тому у нашому випадку в автоматичній системі керування температурою централізованого типу було використано ПД-регулятор [5].

При розробці централізованих систем керування температурою з аналоговою шиною досліджені питання зменшення похибок. Основними похибками такої системи є похибка квантування і похибка із-за шумів.

На основі проведеного аналізу пристроїв, конструктивних схем та методів щодо завадозахищеності було рекомендовано: похибку із-за шумів знижувати за допомогою впровадження в систему фазового автопідлаштування частоти (ФАПЧ), який регулює фазу запропонованого керованого генератора так, щоб вона відповідала фазі опорного сигналу або відрізнялася від функції, відомої з часом [6]. ФАПЧ порівнює фази вхідного та опорного сигналів та видає сигнал помилки, пов'язаний з різницею між цими фазами. Сигнал про помилку продовжується через фільтр низьких частот і використовується як контроль для генератора керованого напругою (ГКН), який забезпечує негативний зворотний зв'язок. Якщо вихідна частота відхиляється від опорної, сигнал помилки збільшується і впливає на генератор керований напругою, у напрямку зменшення помилок. У рівновазі вихідний сигнал фіксується на опорній частоті.

На рис. 5. представлена структурна схема ФАПЧ в умовних позначеннях. Схема включає фазовий детектор, який представляє собою помножувач з коефіцієнтом посилення  $-K_d$ , петлевий фільтр  $-F(s)$ , який формує керуючу напругу (або сигнал помилки)  $e(t)$ .

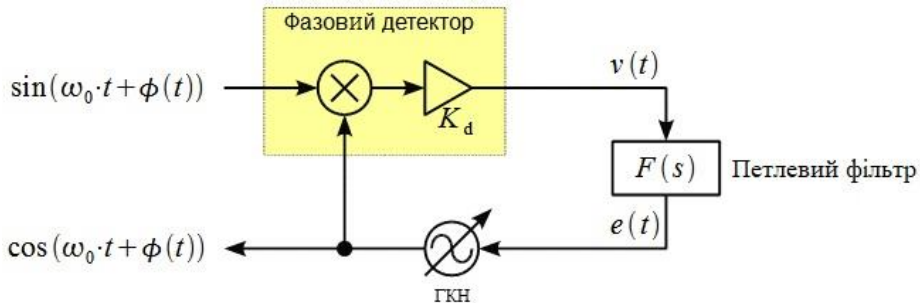


Рис. 5. Структурна схема ФАПЧ:  $F(s)$  – петлевий фільтр,  $K_d$  – коефіцієнт посилення,  $e(t)$  – керуюча напруга

Для підтримки частоти генератора, область, в якій частоту можна керувати, вважається областю детектора з пропускнуою здатністю керування. Поза межами діапазону детектора контролер опускається до нуля, а частота вхідного сигналу не залежить від частоти стоп-сигналу.

Так як в нашій системі використовується частотно-модульований сигнал, основним завданням при вимірюванні частот стає зменшення похибки квантування зміни частоти. Для цього проведено аналіз існуючих трьох методів зменшення похибки квантування.

Перший метод - частотомір середніх значень. Цей метод є завадозахищеним, точним, але не швидкодіє. Другий метод – періодомір. Цей метод є точним, швидкодіє але не завадозахищеним. І третій метод - «метод залежних вимірювань». Проведений порівняльний аналіз існуючих методів показав, що най-

більш ефективним методом вимірювання частоти є «метод залежних вимірювань», який бере найкраще з двох попередніх і є точним, швидкодієвим і захищеним. Застосування цього методу дозволяє зменшити похибку квантування приблизно до нуля.

В результаті проведених досліджень запропонована автоматична система керування температурою у складських приміщеннях мультитемпературного типу класу «С», схема роботи якої представлено на рис.6.

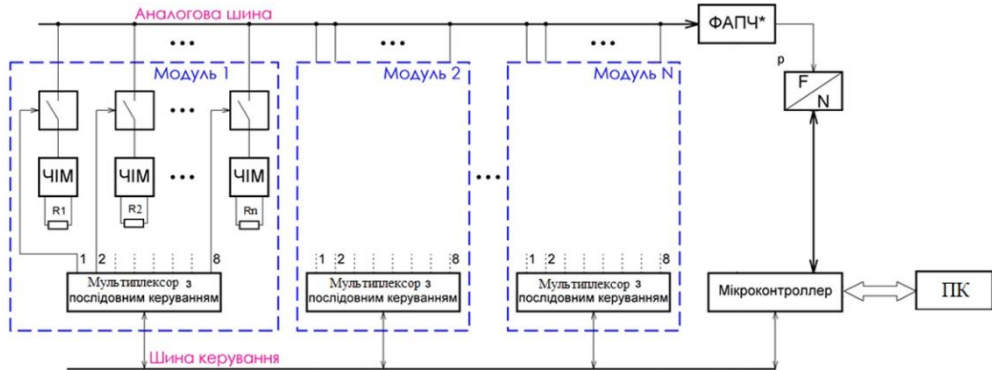


Рис.6. Схема роботи системи:  $F/N$  – перетворювач частоти в код, ЧІМ – частотно-імпульсний модулятор

Система складається з  $N$  ідентичних модулів вводу сигналів датчиків неелектричних величин – резистивних  $R_1$  (або ємнісних  $C_1$ ), які включені в частототворюючі ланки ЧІМ-модуляторів. Останні виконані за схемою «квадратичного» ПНЧ з вихідною трикутною напругою робочою частотою в межах від 600 Гц до 3000 Гц. До кожного з модулів підключається по 8 датчиків. Вибір одного з датчиків у черговому модулі здійснюється за допомогою послідовної шини керування DaisyChained або послідовного периферійного інтерфейсу SPI. Для забезпечення підключення до аналогової шини (одно- або двопровідної) обраного ЧІМ застосовуються схема «монтажного АБО» на основі буферних каскадів з комплементарними емітерними повторювачами з третім станом (обидва зачинені).

Вихідний сигнал кожного з модулів послідовно в часі потрапляє на вхід широкопasmової системи ФАПЧ на основі структури, яка забезпечує очищення нуль-переходів вхідного сигналу перед операцією безпосереднього перетворення частоти в код. Для зменшення фазового шуму в систему введено додатковий контур регулювання на основі ітераційного інтегруючого перетворювача з динамічним запам'ятовуючим пристроєм.

Для підтвердження доцільності використання розробленої схеми проведено її експериментальне дослідження та аналіз похибок. В результаті виконаних розрахунків встановлено, що швидкодія – час стояння на точці становить менше 0,1 секунди; системна мультиплікативна похибка не перевищує 0,15%, а адитивна приведена похибка дорівнює 0,05% і основна похибка буде похибка самого датчика, який буде використовуватись при побудові такої системи. Порівняльний аналіз систем автоматичного керування температурою централізованого типу з ФАПЧ і без нього показали, що без використання ФАПЧ похибки шумів системи склали майже 30%. Але, після впровадження ФАПЧ похибки шумів зменшились майже до 0. В таблиці це представлено результатами останнього стовпчика.

Таблиця

## Результати експерименту

Частота вхідного сигналу, Гц	Період вхідного сигналу, мс	Результат вимірювання періоду, мс	Результат вимірювання частоти, Гц	Відносна похибка вимірювання, %
160	6,25	6,2499	160,0026	0,0016
200	5	5,00002	199,9992	0,0004
250	4	4,000017	249,9989	0,0004
285,7	3,50018	3,5000	285,714	0,005
333,3	3,0003	3,0000	333,333	0,010
400	2,5	2,49998	400,0036	0,0010
500	2	1,99996	500,01	0,002
625	1,6	1,6000077	624,997	0,0005
714,3	1,39997	1,399987	714,29251	0,001
800	1,25	1,249976	800,015	0,002
1000	1	0,999995	1000,005	0,0005

**Висновки.** Запропонована система автоматичного керування температурою аналогової шини має високі технічні характеристики, а саме - в повній мірі задовольняє 3 основним параметрам: швидкодія - час стояння на точці менше 0,1 секунди. Що стосується точності системи, то системна мультиплікативна похибка не перевищує 0,15%, а адитивна приведена похибка дорівнює 0,05% і основна похибка буде похибка самого датчика, який буде використовуватись при побудові такої системи; завадо захищеність знижена з 30% похибки майже до нуля. Тому, застосування автоматичних систем керування температурою із високими техніко-економічними характеристиками є економічно рентабельною та дозволяє для невеликих складів продукції значно розширити ринок застосування таких систем.

## Список літератури

1. Складська нерухомість. Класифікація. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.uvecon.ua/ru/skladska-neruhomist-klasifikatsiya-skladi-klasu.html>
2. Як має здійснюватися зберігання продуктів харчування. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://olteba.com/article/kak\\_dolzno\\_osushestvlyatsya\\_hranenie\\_pishevih\\_produktov](https://olteba.com/article/kak_dolzno_osushestvlyatsya_hranenie_pishevih_produktov)
3. Види систем керування. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://intuit.ru/studies/courses/3443/685/lecture/32363>
4. Автоматична система керування. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0\\_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0\\_%D0%BA%D0%B5%D1%80%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%BA%D0%B5%D1%80%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F)
5. Різновид регуляторів. П, ПІ, ПД і ПІД регулятори. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://automation-system.ru/main/15-regulyator/type-of-control/90-408-p-pid.html>
6. Фазове автопідлаштування частоти (ФАПЧ). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B5\\_%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BF%D1%96%D0%B4%D0%BB%D0%B0%D1%88%D1%82%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F\\_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B8](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B5_%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BF%D1%96%D0%B4%D0%BB%D0%B0%D1%88%D1%82%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B8)

7. Похибка вимірювання. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%B1%D0%BA%D0%B0\\_%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%B1%D0%BA%D0%B0_%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F)

8. Сарабєєв П.І., Башта О.В., Носко П.Л. Автоматична система керування температурою у складських приміщеннях / ПОЛІТ. Сучасні проблеми науки: XXI міжнар. наук.-практ. конф. студ. та молодих учених, 5-9 квітня 2021 р.: тези доп. – К., 2021. – С. 57-59. Available at: <http://aki.nau.edu.ua/wp-content/uploads/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA-%D1%82%D0%B5%D0%B7-2021.pdf>

Стаття надійшла до редакції 27.05.2021.

**Сарабєєв Павло Ігорович** – магістр, Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна.

**Носко Павло Леонідович** – д.т.н., професор, професор кафедри машинознавства, стандартизації та сертифікації Національного авіаційного університету, м. Київ, Україна, тел. 406-78-42.

**Башта Олександр Васильович** – к.т.н., доц., доцент кафедри машинознавства, стандартизації та сертифікації Національного авіаційного університету, м. Київ, Україна, nau12@ukr.net.

**Мельник Володимир Борисович** – канд. техн. наук, доцент кафедри машинознавства, стандартизації та сертифікації Національного авіаційного університету, м. Київ, Україна, nau12@ukr.net.

**Герасимова Ольга В'ячеславівна** – Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна, тел. 406-78-42, nau12@ukr.net.

P. SARABIEIEV, P. NOSKO, O. BASHTA, V. MELNYK, O. GERASIMOVA

## DEVELOPMENT OF AUTOMATIC TEMPERATURE CONTROL SYSTEM IN WAREHOUSES OF MULTITEMPERATURE TYPE CLASS "C"

In the development of centralized temperature control systems with analog bus, the issues of error reduction are investigated. The main errors of such a system are the quantization error and the error due to noise. Based on the analysis of devices, design schemes and methods for noise immunity, it was recommended: to reduce the error due to noise by introducing a phase-locked loop (PLL) system that regulates the phase of the proposed controlled generator so that it corresponds to the reference signal phase or differed from the function known over time. A comparative analysis of existing methods has shown that the most effective method of measuring frequency is the "method of dependent measurements", which takes the best of the previous two and is accurate, fast and noise-proof. For warehouses of multi-temperature type of class "C" the automatic control system of temperature of the centralized type on the analog bus which has high technical characteristics is offered, namely: speed - time of standing on a point less than 0.1 seconds; the system multiplicative error does not exceed 0.15%, and the additive reduced error is equal to 0.05%; noise immunity is reduced from 30% error to almost zero. The system consists of N identical modules of signal input of sensors of non-electric quantities - resistive R1 (or capacitive C1), which are included in the frequency-forming units of PWM modulators. 8 sensors are connected to each of the modules. One of the sensors in the next module is selected using the DaisyChained serial control bus or the serial SPI peripheral interface. The use of such systems is cost-effective and allows for small premises to significantly expand the market for warehousing products.

**Keywords:** centralized type system, storage room, temperature, measuring channel, temperature regulator, temperature mode, analog bus, speed, error, noise protection.

### References

1. Skladska nerukhomist. Klasyfikatsiia. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://www.uvecon.ua/ru/skladska-nerukhomist-klasifikatsiya-skladi-klasu.html>
2. Iak maie zdiisniuvatsia zberihannia produktiv kharchuvannia. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: [https://olteba.com/article/kak\\_dolzno\\_osushestvlyatsya\\_hranenie\\_pishevih\\_produkto](https://olteba.com/article/kak_dolzno_osushestvlyatsya_hranenie_pishevih_produkto)
3. Vydy system keruvannia. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://intuit.ru/studies/courses/3443/685/lecture/32363>
4. Avtomatychna systema keruvannia. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0\\_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0\\_%D0%BA%D0%B5%D1%80%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%BA%D0%B5%D1%80%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F)
5. Riznovyd rehulioriv. P, PI, PD i PID rehuliatory. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://automation-system.ru/main/15-regulyator/type-of-control/90-408-p-pi-pid.html>
6. Fazove avtopidlashtuvannia chastoty (FAPCh). [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B5\\_%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BF%D1%96%D0%B4%D0%BB%D0%B0%D1%88%D1%82%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F\\_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B8](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B5_%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BF%D1%96%D0%B4%D0%BB%D0%B0%D1%88%D1%82%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B8)
7. Pokhybka vymiriuvannia. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%B1%D0%BA%D0%B0\\_%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%B1%D0%BA%D0%B0_%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F)
8. Sarabiev P.I., Bashta O.V., Nosko P.L. Avtomatychna systema keruvannia tempera-turoiu u skladskykh prymishchenniakh / POLIT. Suchasni problemy nauky: KhKhI mizhnar. nauk.-prakt. konf. stud. ta molodykh uchenykh, 5-9 kvitnia 2021 r.: tezy dop. – K., 2021. – S. 57-59. Available at: <http://aki.nau.edu.ua/wpcontent/uploads/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA-%D1%82%D0%B5%D0%B7-2021.pdf>