

УДК 621.396.946: 004.042

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/05>**Новіков В.І.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лисенко О.І.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Тачиніна О.М.**

Національний авіаційний університет

**Гуйда О.Г.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**МЕТОДИКА СИНТЕЗУ АЛГОРИТМУ ЦИФРОВОГО  
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ПОВІТРЯ  
В САЛОНІ МОБІЛЬНОГО ЦЕНТРУ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ  
ЛІТАЮЧОЇ (ПОВІТРЯНОЇ) СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ**

*Стаття присвячена розробці методики синтезу алгоритму цифрового автоматичного керування температурою повітря в салоні мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі. Для підтримки заданого значення температури пропонується застосовувати цифрову систему автоматичного керування, що забезпечить номінальний режим функціонування мобільного центру обробки інформації. У роботі вибрано прототип цифрової системи автоматичного керування і вивчено принцип його дії. Побудовано комп'ютерну математичну модель прототипу і досліджено на моделі його властивості, що показало виникнення додаткових перехідних процесів, які можуть негативно вплинути на роботу мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі. Виконано вдосконалення прототипу шляхом застосування цифрового закону керування, який побудовано на основі цифрового пропорційно-інтегрального регулятора. Налаштовано цифровий пропорційно-інтегральний регулятор із використанням методу Зіглера-Ніколса. Виконано порівняльний комп'ютерний експеримент (імітаційне моделювання) прототипу та вдосконаленої системи керування. Завдяки використанню цифрової системи автоматичного керування, що побудована на основі алгоритму цифрового пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання (ЦПІД-регулятор), вдалося зменшити майже на 30% тривалість перехідного процесу та уникнути додаткових коливань у цьому процесі. Таке покращення якості регулювання температури повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі створює умови для підвищення надійності функціонування цього центру. Подальшого покращення якості роботи ЦСАК температурою повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації можна досягти завдяки побудові адаптивної ЦСАК.*

**Ключові слова:** мобільні сенсори, сенсорні мережі, цифрова система автоматичного керування, цифровий пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор, метод Зіглера-Ніколса.

**Постановка проблеми.** Мобільні сенсорні мережі являють собою сукупність малопотужних, порівняно недорогих і компактних приладів, частина з яких забезпечена сенсорами або іншими джерелами інформації, які включені в деяке фізичне оточення і об'єднані за допомогою радіоканалу. Область покриття таких мереж може становити від кількох квадратних метрів до кількох квадратних кілометрів завдяки ретрансляції повідомлень від одного елемента мережі до іншого [11].

З розвитком технологій мобільні сенсорні мережі дедалі частіше використовуються для моніторингу різних типів даних: у системах безпеки, контролю конструкцій, параметрів навколишнього середовища, для відслідковування цілей під час бойових дій. У таких системах ці дані фіксуються мультисенсорами, які входять до складу вузлів, що розташовуються в необхідних для моніторингу точках. Ці дані передаються по мобільній мережі в центральний вузол для обробки і подальшого прийняття рішення.

Літаюча (повітряна) сенсорна мережа з мобільним центром обробки інформації призначена для застосування в зоні надзвичайної ситуації, де можливі значні зовнішні температурні впливи [5; 8].

**Постановка завдання.** Для прецизійної підтримки заданого значення температури повітря в салоні (приміщенні), де розташовано обладнання для обробки і зберігання інформації, пропонується застосувати цифрову систему автоматичного керування [1]. Це дасть змогу забезпечити номінальний режим функціонування мобільного центру обробки інформації.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для синтезу алгоритму цифрового автоматичного керування температурою повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі пропонується застосувати методику, згідно з якою необхідно:

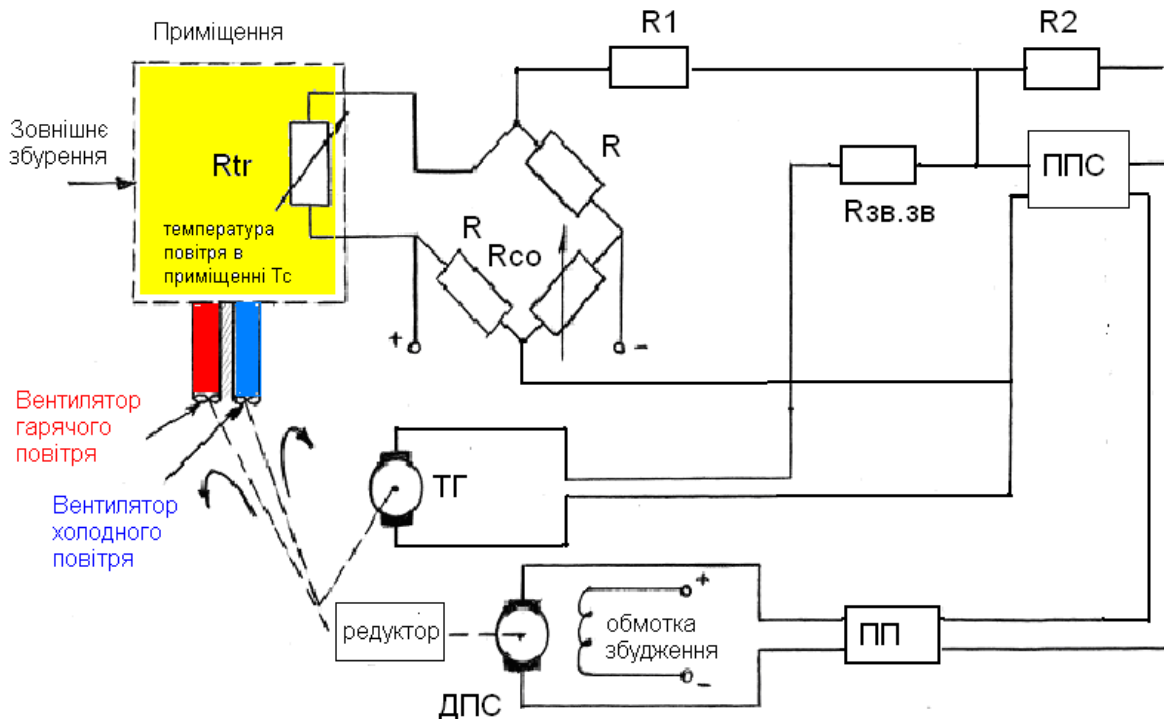
- 1) обрати прототип ЦСАК і вивчити принцип його дії;
- 2) побудувати комп'ютерну математичну модель прототипу і дослідити на моделі його властивості;
- 3) виконати вдосконалення прототипу шляхом застосування цифрового закону керування, який побудовано на основі цифрового пропорційно-інтегрального регулятора (ЦПІД-регулятора);

4) налаштувати ЦПІД-регулятор із використанням методу Зіглера-Ніколса;

5) виконати порівняльний комп'ютерний експеримент (імітаційне моделювання) прототипу та вдосконаленої системи керування.

**Виконання пунктів методики**

1. Як прототип системи використаємо аналогову систему терморегулювання, спрощена принципова схема якої показана на рис. 1. Робота системи полягає в наведеному далі. Мостова схема разом із чутливим елементом ( $R_{tr}$ ) виконує функцію датчика температури  $T_c$  у салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації, тобто датчика первинної інформації (ДПІ). Якщо температура повітря  $T_c$  дорівнює заданій  $T_{co}$ , то міст збалансовано. У разі відхилення температури повітря  $T_c$  у салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації від температури  $T_{co}$ , яка задається за допомогою  $R_{co}$ , з мосту знімається напруга, величина і знак якої залежать від величини та знаку відхилення температури. Після посилення сигнал подається на двигун постійного струму (ДПС), який обертає вентилятори, що подають гаряче чи холодне повітря в салон (приміщення) мобільного центру обробки інформації і міст збалансовується завдяки зміні опору  $R_{tr}$ .



**Рис. 1.** Спрощена принципова схема аналогової системи автоматичного керування температурою повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі: ППС – підсилювач постійного струму; ПП – підсилювач потужності; ДПС – двигун постійного струму; R – редуктор; вентилятори гарячого і холодного повітря обертаються назустріч один одному; ДПІ – датчик первинної інформації; ТГ – тахогенератор, який виконує функцію жорсткого зворотного зв’язку

2. Структурна схема математичної моделі аналогової (неперервної) системи автоматичного керування має два контури: зовнішній, який забезпечує зворотний зв'язок за температурою, та внутрішній, який забезпечує коригуючу дію за допомогою сигналу, що є пропорційним швидкості обертання ротора ДПС (тобто внутрішній зворотний зв'язок – це жорсткий зворотний зв'язок (див. рис. 2)).

Припустимо, що математичні моделі ДПІ, ППС, ПП, ДПС, ТГ, ОК, які є складниками структурної схеми (рис. 2), представлені передавальними функціями вигляду відповідно [1]:

$$W_{dpi}(s) = \frac{1}{0.001s + 1}; W_{pps}(s) = \frac{5}{0.01s + 1};$$

$$W_{pp}(s) = \frac{2}{0.03s + 1};$$

$$W_{dps}(s) = \frac{1}{0.04s^2 + 1.3s + 1}; W_{tg}(s) = 1; W_{ok}(s) = \frac{5}{7s + 1}.$$

Комп'ютерна математична модель, яка побудована з використанням системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink [2–4], представлена на рис. 3.

Перехідний процес, який відображає зміну в часі температури повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі, представлено на рис. 4.

Результати моделювання показують, що в разі зміни заданої температури в системі виникають «додаткові» перехідні процеси, що може негативно вплинути на роботу мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі. Виконаємо вдосконалення системи терморегулювання повітря завдяки використанню ЦПД-регулятора.

3. Вдосконалена завдяки використанню ЦПД-регулятора структурна схема математичної моделі системи терморегулювання повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі, представлена на рис. 5.

Комп'ютерна математична модель ЦСАК температурою повітря, яка побудована із використанням системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink, представлена на рис. 6.

4. Налаштування  $K_{ps}$ ,  $K_{is}$ ,  $K_{dc}$  – коефіцієнтів передачі цифрового сигналу ЦПД-регулятора виконаємо з використанням методу Зіглера-Ніколса [6; 7; 9; 10].

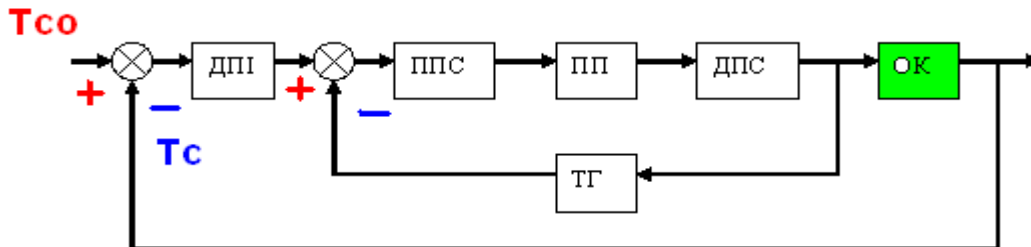


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі аналогової (неперервної) системи автоматичного керування – системи, яка обрана прототипом для побудови ЦСАК

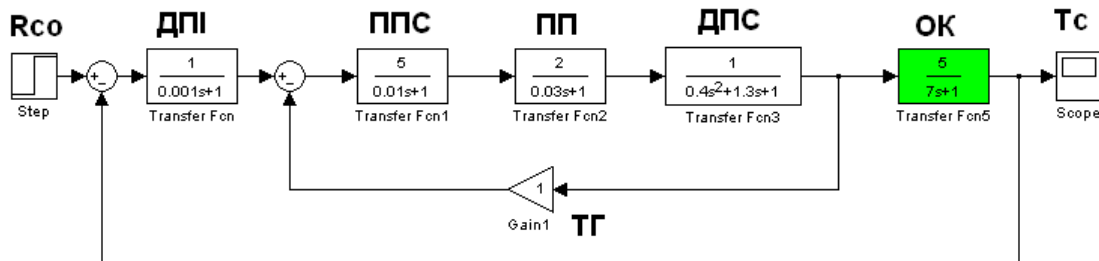


Рис. 3. Комп'ютерна математична модель аналогової системи автоматичного керування, яка вибрана прототипом для побудови ЦСАК:  $R_{co}$  позначає резистор, зміна опорів якого задає бажану температуру; осцилограф, який позначено  $T_c$ , дає змогу спостерігати перехідний процес зміни температури повітря

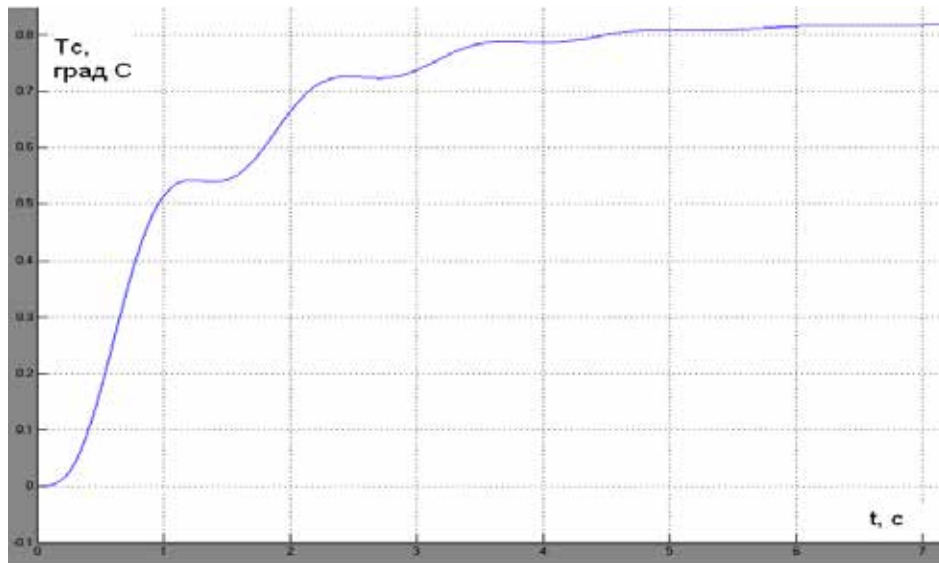


Рис. 4. Результат комп'ютерного моделювання перехідного процесу в системі терморегулювання, яка вибрана як система-прототип

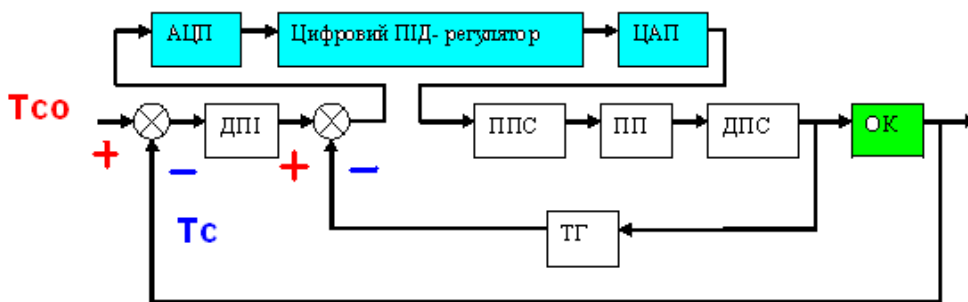


Рис. 5. Структурна схема математичної моделі ЦСАК температурою повітря

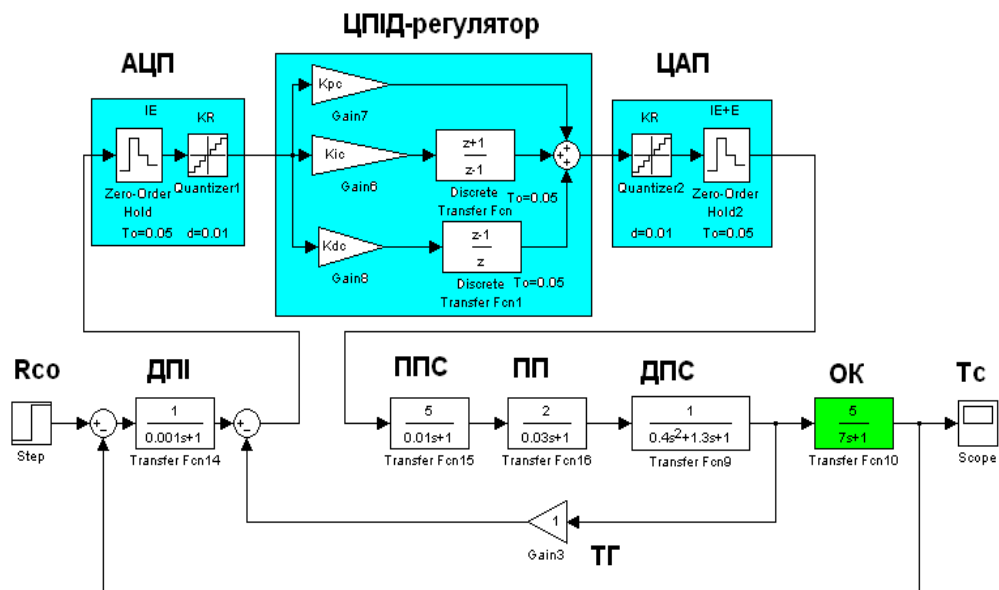


Рис. 6. Комп'ютерна математична модель ЦСАК, яка побудована з використанням цифрового пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора (ЦПД-регулятора): Крс, Кіс, Кдс – коефіцієнти передачі цифрового сигналу в каналах пропорційному, інтегральному та диференціальному відповідно

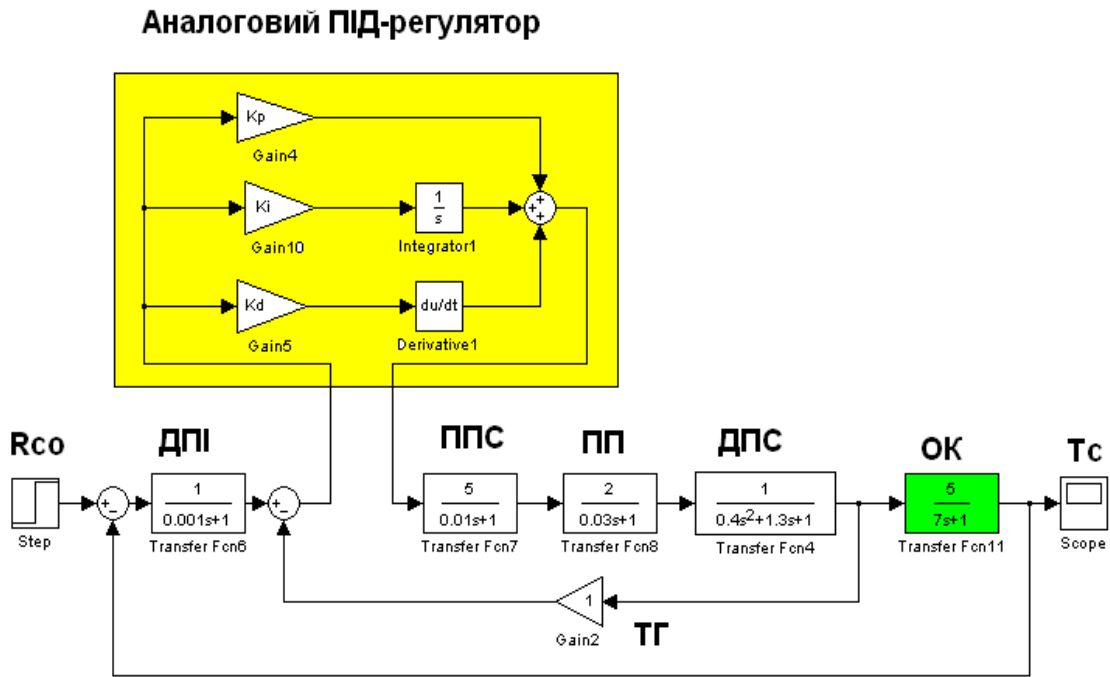


Рис. 7. Комп'ютерна математична модель аналогової (неперервної) САК температурою повітря, яка використовується для налаштування ПІД-регулятора

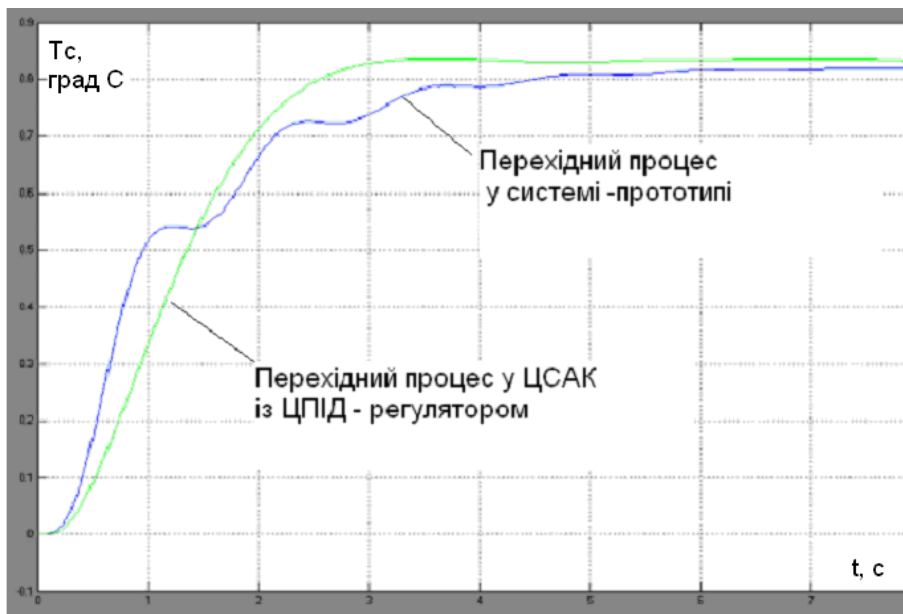


Рис. 8. Результати порівняльного комп'ютерного експерименту

**Етапи методу**

1. Побудувати комп'ютерну математичну модель аналогової (неперервної) САК температурою повітря з аналоговим ПІД – регулятором (див. рис. 7).

2. Встановити значення коефіцієнтів аналогового ПІД – регулятора  $K_i = 0$ ,  $K_d = 0$ , а величину коефіцієнта  $K_p$ , починаючи з  $K_p = 1$ , змінювати до того значення  $K_0$ , при якому система стане коли-

вальною і можна виділити приблизно 5–7 точок перетину графіку перехідного процесу зі сталим рівнем.

3. При  $K_p = K_0$  необхідно виміряти за графіком перехідного процесу період коливаний цього процесу. Позначимо цей період  $P_0$ .

4. Обчислити раціональні значення коефіцієнтів аналогового та цифрового ПІД-регуляторів (див. табл. 1).

У результаті комп'ютерного моделювання отримано:  $K_0 = 2$ ,  $P_0 = 2$  с.

Таблиця 1

**Формули для обчислення раціональних (прийнятних) значень коефіцієнтів аналогового та цифрового ПІД-регуляторів**

| Аналоговий ПІД-регулятор  | Цифровий ПІД-регулятор                   |
|---------------------------|--|
| $K_p = 0,6 * K_0$         | $K_{pc} = 0,6 * K_0$                     |
| $K_i = 1,2 * (K_0 / P_0)$ | $K_{ic} = 1,2 * (K_0 / P_0) * (T_0 / 2)$ |
| $K_d = 0,075 * K_0 * P_0$ | $K_{dc} = (0,075 * K_0 * P_0) / T_0$     |

Після підстановки  $K_0 = X2$ ,  $P_0 = 2$  с та  $T_0 = 0.05$  с у формули, що записані в табл. 1.1, отримуємо шукані значення коефіцієнтів:

$$K_p = 0,6 * K_0 = 0.6 * 2 = 1.2;$$

$$K_i = 1,2 * (K_0 / P_0) = 1.2 * 2 / 2 = 1.2;$$

$K_d = 0,075 * K_0 * P_0 = 0.075 * 2 * 2 = 0.3$  для аналогового ПІД-регулятора та

$$K_{pc} = 0,6 * K_0 = K_p = 1.2, K_{ic} = 1,2 * (K_0 / P_0) * (T_0 / 2) = K_i * T_0 / 2 = 1.2 * 0.05 / 2 = 0.03,$$

$$K_{dc} = (0,075 * K_0 * P_0) / T_0 = K_d / T_0 = 0.3 / 0.05 = 6,$$

де  $T_0$  – період (крок) квантування за часом, який обрано таким, що він дорівнює 0.05 с, для цифрового ПІД-регулятора.

5. Результати порівняльного комп'ютерного експерименту (імітаційне моделювання) якості функціонування системи-прототипу та вдосконаленої системи керування, в якій застосовано ЦПІД-регулятор, представлені на рис. 8.

**Висновки.** Завдяки використанню ЦСАК, що побудована на основі алгоритму цифрового пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання (ЦПІД-регулятор), вдалося зменшити майже на 30% тривалість перехідного процесу та уникнути додаткових коливань у цьому процесі.

Таке покращення якості регулювання температури повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі створює умови для підвищення надійності функціонування цього центру.

Подальшого покращення якості роботи ЦСАК температурою повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації можна досягти завдяки побудові адаптивної ЦСАК.

**Список літератури:**

1. Servotechnica. URL: [http://www.servotechnica.ru/project/index.pl?id\\_service=22](http://www.servotechnica.ru/project/index.pl?id_service=22) (last accessed 2020/2/21).
2. D'yakonov, V.: MATLAB 7.\*/R2006/R2007: Self-instruction, DMK-Press, Moscow, (2008).
3. D'yakonov, V. (2008) Simulink 5/6/7: Self-instruction, DMK-Press, Moscow.
4. D'yakonov, V. (2010) VisSim + Mathcad + MATLAB. Visual mathematical modeling. SOLON-Press, Moscow.
5. Lysenko, O., Tachinina, O., Chumachenko, S.: Mathematical formulation of the optimization problem of movement of a group of quadcopters. *Technical mechanics*. 2016. Vol. 1. Pp. 73–78.
6. German-Galkin, S. (2011) Matlab & Simulink. Proektirovanie mehatronnykh sistem na PK [Matlab & Simulink. Designing Mechatronic Systems on PC]. KORONA-Vek Publ., St. Petersburg.
7. Isermann, R: Digital Control Systems. Springer-Verlag (1981).
8. Lysenko, O., Tachinina, O., Chumachenko, S., and it. Modeli primeneniya informatsionno-telekommunikatsionnykh tekhnologiy na osnove bespilotnykh aviatsionnykh kompleksov v chrezvychnykh situatsiyakh [Models of application of information-telecommunication technologies on the basis of unmanned aerial systems in emergency situations]. Lap-Lambert Academic-Publishing (2018).
9. Dorf, R., Bishop, R.: Sovremennyye sistemy upravleniya [Modern Control Systems]. Laboratory of Basic Knowledge Moscow (2002).
10. Goodwin, G., Grebe S., Salgado M.: Proyektirovaniye sistem upravleniya [Design Control Systems]. Laboratory of Knowledge, Moscow (2004).
11. Лисенко О.І., Новіков В.І., Петрова В.М., Гуйда О.Г. Процедура синтезу топології безпроводової сенсорної мережі моніторингу цілей із мінімізацією загальної потужності передачі вузлів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, серія «Технічні науки»*. 2018. Том 29 (68) № 6, ч. 1. С. 69–72.

**Novikov V.I., Lysenko O.I., Tachinina O.M., Guida O.H. METHODS OF SYNTHESIS ALGORITHM DIGITAL AUTOMATIC TEMPERATURE CONTROL AIR IN THE CABIN MOBILE DATA PROCESSING CENTER FLYING (AIR) SENSOR NETWORKS**

*The article is devoted to developing methods for the synthesis algorithm of digital automatic control air temperature inside a mobile information center flying (air) sensor network. To maintain the set temperature, it is proposed to use a digital automatic control system, which will provide the nominal mode of operation*

*of the mobile information processing center. The prototype of the digital automatic control system is chosen and the principle of its operation is studied. A computer mathematical model of the prototype was built and investigated on the model of its properties, which showed the emergence of additional transients that can negatively affect the operation of the mobile information processing center of the flying 9-air) sensor network. The prototype was improved by applying the digital control law, which is based on a digital proportional-integrated controller. A digital proportional-integrated controller is set up using the Ziegler-Nichols method. A comparative computer experiment (simulation) of a prototype and an improved control system was performed. Thanks to the use of digital automatic control system, built on the algorithm of digital proportional-integral-differential control (CPID-regulator), it was possible to reduce the duration of the transient process by almost 30% and avoid additional fluctuations in this process. This improvement in the quality of air temperature control in the cabin (premises) of the mobile information processing center of the flying (air) sensor network creates conditions for improving the reliability of this center. Further improvement of the quality of CSAC operation by the air temperature in the cabin (premises) of the mobile information processing center can be achieved by building an adaptive CSAC.*

**Key words:** *mobile sensors, sensor networks, digital automatic control system, digital proportional-integral-differential controller, Ziegler-Nichols method.*