

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ВЕНТИЛЯТОРА В СЕРЕДОВИЩІ SCILAB/XCOS

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У цій роботі розроблено комплекс моделей автоматичної системи керування швидкістю вентилятора з датчиком температури, що включає вербальну, структурну, функціональну та імітаційну моделі. Структурна модель подана у вигляді орієнтованого графа функціональних блоків системи з урахуванням датчика температури як джерела зворотного зв'язку та теплового навантаження як зовнішнього буріння. Система реалізує принцип закріпленого контуру регулювання з пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) контролером, що забезпечує підтримку заданої температури шляхом автоматичного регулювання швидкості обертання вентилятора. Імітаційну модель реалізовано в середовищі Scilab/Xcos. Результати моделювання підтверджують нульову статичну похибку в усталеному режимі та перерегулювання близько 20% за час стабілізації близько 8 с.

Ключові слова: вентилятор, ШІМ-керування, ПІД-регулятор, датчик температури, зворотний зв'язок, імітаційна модель, Scilab/Xcos, перехідний процес.

Abstract

In this work, a set of models of an automatic fan speed control system with a temperature sensor has been developed, including verbal, structural, functional, and simulation models. The structural model is presented as a directed graph of functional system blocks, considering the temperature sensor as the source of feedback and thermal load as an external disturbance. The system implements the principle of a closed-loop control with a PID controller that maintains a given temperature by automatically adjusting the fan rotation speed. The simulation model is implemented in Scilab/Xcos. Simulation results confirm zero steady-state error with an overshoot of approximately 20% and a settling time of about 8 seconds.

Keywords: fan, PWM control, PID controller, temperature sensor, feedback, simulation model, Scilab/Xcos, transient response.

Вступ

Системи автоматичного керування швидкістю вентиляторів широко застосовуються як у промисловості, так і в побуті. Вони дозволяють автоматично підтримувати необхідний тепловий режим обладнання залежно від поточного теплового навантаження [1]. Недостатнє охолодження призводить до перегріву та передчасного виходу обладнання з ладу, тоді як постійна робота вентилятора на максимальній швидкості є енергетично неефективною та супроводжується підвищеним рівнем шуму. Автоматичне регулювання швидкості вентилятора дозволяє одночасно забезпечити надійний тепловий захист та скоротити споживання електроенергії на 20–50% порівняно з нерегульованими системами [3].

Метою роботи є розробка комплексу моделей системи керування швидкістю вентилятора з датчиком температури, що включає вербальний опис, структурний граф, функціональні математичні моделі окремих блоків та імітаційну модель у середовищі Scilab/Xcos.

Вербальна модель

Об'єктом дослідження є автоматизована система керування швидкістю обертання вентилятора. Її основне призначення полягає у підтриманні заданої температури охолоджуваного об'єкта шляхом автоматичного регулювання швидкості вентилятора залежно від поточного теплового стану системи. Система функціонує за принципом замкнутого контуру керування: датчик температури неперервно вимірює фактичну температуру об'єкта, контролер порівнює виміряне значення із заданою уставкою та формує керувальний сигнал на зміну швидкості обертання вентилятора.

До складу системи входять: вентилятор постійного струму як виконавчий елемент; датчик температури на базі термістора NTC, що перетворює температуру на електричний сигнал;

контролер (ПД-регулятор); ШІМ-драйвер вентилятора; джерело живлення; охолоджуваний об'єкт як джерело теплового навантаження. Основним збуренням є теплове навантаження $Q(t)$, що змінюється залежно від режиму роботи обладнання.

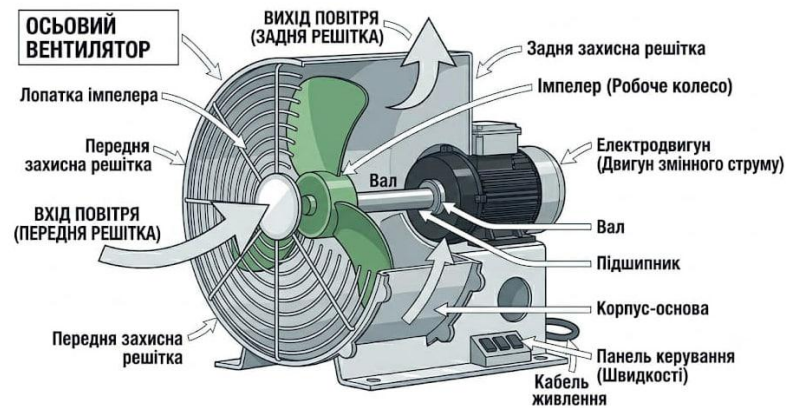


Рисунок 1. — Схема настільного вентилятора з регулюваною швидкістю

Система керування формує керуючий ШІМ-сигнал на вентилятор, змінюючи швидкість його обертання у діапазоні 0–100%. Датчик температури вимірює фактичну температуру об'єкта і передає сигнал зворотного зв'язку до контролера. Теплове навантаження є джерелом зовнішнього збурення $Q(t)$, яке діє безпосередньо на охолоджуваний об'єкт. Завдяки замкненому контуру система автоматично компенсує зміни теплового навантаження та підтримує задану температуру [2].

Структурна модель (граф)

Структурна модель системи подана у вигляді орієнтованого графа, вершинами якого є реальні функціональні блоки системи, а дуги відображають напрям їх взаємодії. На відміну від графа імітаційної моделі, у структурній моделі не використовуються умовні блоки. Зворотний зв'язок формується від датчика температури, який вимірює фактичну температуру охолоджуваного об'єкта і передає інформацію до контролера.

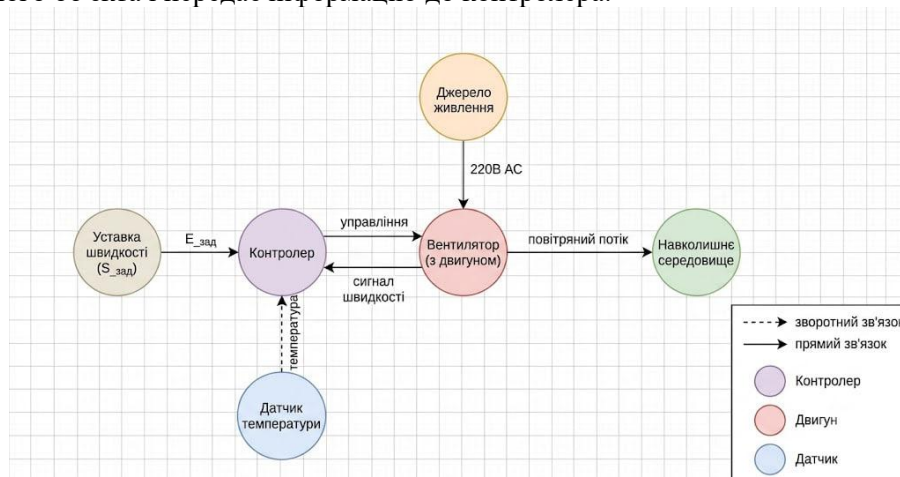


Рисунок 2 — Граф структурної моделі системи керування швидкістю вентилятора

Функціональні моделі блоків

Для побудови імітаційної моделі елементи системи подано у вигляді функціональних блоків із відповідними передатними функціями у просторі Лапласа.

Блок 1 — Вентилятор. Вентилятор постійного струму моделюється як аперіодична ланка першого порядку. Залежність швидкості обертання від вхідного ШІМ-сигналу:

$$n = k_f \cdot u_{ШІМ} \quad (1)$$

Де: n — швидкість обертання, об/хв; k_f — коефіцієнт підсилення; $u_{ШІМ}$ — шпаруватість ШІМ-сигналу (0–1).

Передатна функція:

$$W_{fan}(s) = 0,5s + 1120 \quad (2)$$

Де: 120 — коефіцієнт підсилення (об/хв на одиницю ШІМ); 0,5 с — стала часу двигуна вентилятора.

Блок 2 — Датчик температури. Датчик на базі термістора NTC перетворює температуру на електричний сигнал за характеристикою:

$$U_{вих} = k_d \cdot T \quad (3)$$

Де: $U_{вих}$ — вихідна напруга датчика, В; k_d — коефіцієнт перетворення, В/°С; T — температура, °С.

Передатна функція датчика у ланцюзі зворотного зв'язку:

$$W_{sensor}(s) = \frac{1}{0,1s + 1} \quad (4)$$

Де: 0,1 с — стала часу, що відповідає тепловій інерції термістора NTC.

Датчик вимірює сумарну температуру об'єкта — як від внутрішнього нагріву, так і від зовнішнього теплового навантаження.

Блок 3 — Контролер. Контролер обчислює похибку регулювання:

$$\varepsilon(t) = T_{зад} - T_{факт} \quad (5)$$

та формує керувальний сигнал за пропорційно-інтегрально-диференціальним законом:

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int \varepsilon(t) dt + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (6)$$

Блок 4 — Об'єкт охолодження. Теплове навантаження моделюється як зовнішнє збурення. У базовому варіанті: $Q = 10^\circ\text{C}$. Передатна функція об'єкта керування (охолоджуваний об'єкт):

$$W_{obj}(s) = 1/(0,8s + 1) \quad (7)$$

Де: 0,8 с — теплова стала часу, що відображає інерційність нагріву та охолодження об'єкта.

Загальна передатна функція замкненої системи:

$$W(s) = \frac{W_c(s) \cdot W_{fan}(s) \cdot W_{obj}(s)}{1 + W_c(s) \cdot W_{fan}(s) \cdot W_{sensor}(s)} \quad (8)$$

Імітаційна модель у середовищі Scilab/Xcos

Імітаційну модель реалізовано в середовищі Scilab/Xcos, яке призначене для побудови та дослідження динамічних систем [4]. Модель складається з послідовно з'єднаних блоків, що імітують роботу кожного фізичного елемента системи, та контуру зворотного зв'язку.

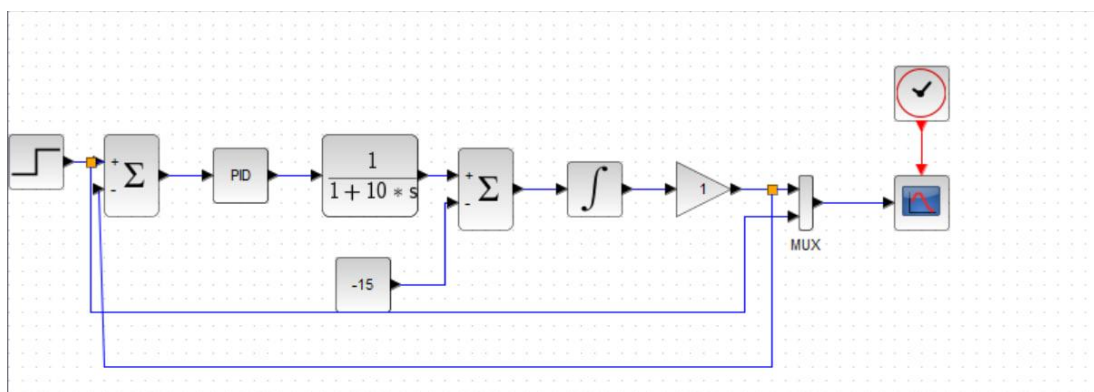


Рисунок 3 — Імітаційна модель системи керування швидкістю вентилятора у середовищі Scilab/Xcos

Задавальний вплив формується блоком STEP як ступінчастий сигнал уставки температури 40°C , що вмикається в момент часу $t = 1$ с. Суматор SUMMATION №1 обчислює похибку $\varepsilon = T_{зад} - T_{факт}$. Блок PID формує керувальний сигнал за ПІД-законом. Блок SATURATION обмежує сигнал у межах 0–1 (0–100% швидкості вентилятора). Блок CLR №1 з передатною функцією $\frac{120}{0,5s+1}$ моделює динаміку вентилятора. Суматор

SUMMATION №2 додає теплове навантаження від блоку CONST (10°C), моделюючи реальну ситуацію, коли датчик вимірює загальну температуру об'єкта. Блок CLR №2 з функцією $\frac{1}{0,8s+1}$ моделює теплову інерційність охолоджуваного об'єкта. Блок CLR №3 з функцією $\frac{1}{0,1s+1}$ — датчик температури у ланцюзі зворотного зв'язку. Результати відображаються на осцилографі CSCOPE.

Результати моделювання

При базових параметрах моделі ($K_p = 0,08$, $K_i = 0,5$, $T_{\text{вентилятора}} = 0,5$ с, $T_{\text{датчика}} = 0,1$ с, $Q = 10^\circ\text{C}$, $T_{\text{зад}} = 40^\circ\text{C}$) отримано перехідний процес, зображений на рисунку 4.

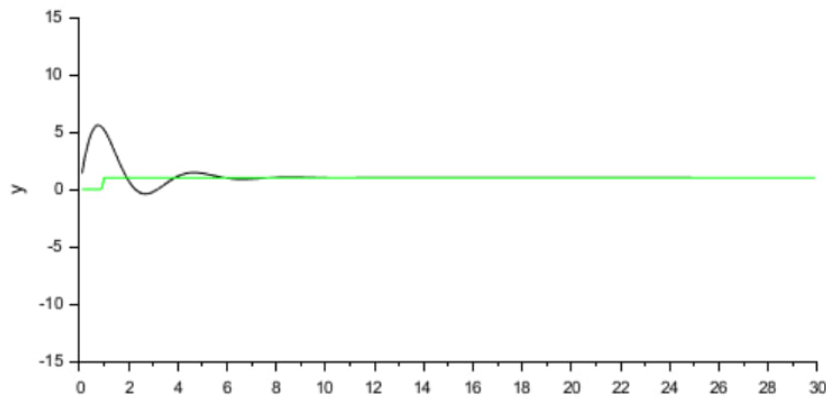


Рисунок 4 — Перехідний процес системи керування швидкістю вентилятора при базових параметрах ПІД-регулятора

До моменту $t = 1$ с система перебуває у стані спокою — температура об'єкта дорівнює температурі навколишнього середовища. У момент $t = 1$ с подається ступінчастий задаючий сигнал 40°C (чорна лінія). Реальна температура (зелена лінія) починає змінюватися завдяки пропорційній складовій регулятора та досягає максимального значення близько 48°C при $t \approx 4$ с, що відповідає перерегулюванню $\sigma \approx 20\%$. Після цього система поступово заспокоюється: відбуваються затухаючі коливання навколо значення уставки, і приблизно до $t = 8$ с температура стабілізується точно на рівні 40°C . Наявність перерегулювання пояснюється тепловою інерційністю об'єкта ($T = 0,8$ с) та накопиченою інтегральною складовою ПІД-регулятора на початковому етапі. Нульова статична похибка в усталеному режимі забезпечується саме інтегральною складовою регулятора.

Отриманий перехідний процес є якісним: система демонструє прийнятне перерегулювання ($\sim 20\%$), помірний час стабілізації (~ 8 с) та нульову статичну похибку. Цей режим роботи відповідає базовим параметрам моделі і є найкращим компромісом між швидкістю та кочливальністю системи.

Висновки

У роботі розроблено комплекс моделей автоматичної системи керування швидкістю вентилятора з датчиком температури. Побудовано вербальну модель, структурний граф функціональних блоків системи, функціональні моделі вентилятора, датчика температури на базі термістора NTC, об'єкта охолодження та ПІД-регулятора, а також імітаційну модель у середовищі Scilab/Xcos. Зворотний зв'язок формується від датчика температури, що вимірює фактичний тепловий стан об'єкта, а зовнішнім збуренням є теплове навантаження від охолоджуваного обладнання [5].

Отримані результати моделювання підтверджують працездатність системи. При базових параметрах забезпечується стабілізація температури на рівні 40°C з перерегулюванням близько 20% та часом стабілізації близько 8 с. Нульова статична похибка досягається завдяки інтегральній складовій ПІД-регулятора. Використання таких систем дозволяє підтримувати надійний тепловий режим обладнання незалежно від змін навантаження та скоротити споживання електроенергії на $20\text{--}50\%$ порівняно з нерегульованими системами [3].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ШІМ та термістор: розумне керування вентиляторами для охолодження систем. MyProject. URL: <https://myproject.com.ua/shim-ta-termistor-rozumne-keruvannia-ventyliatoramy-dlia-okholodzhennia-system.html> (дата звернення: 11.06.2026).
2. Розумна система вентиляції: що це таке та як її зробити. Vents Shop. URL: <https://vents-shop.com.ua/statti-pro-ventilyaciyu-uk/rozumna-sistema-ventilyacii-scho-ce-take-ta-yak-ii-zrobiti/> (дата звернення: 11.06.2026).
3. Моделювання та оптимізація систем : підручник / [Дубовой В. М., Кветний Р. Н., Михальов О. І., Усов А. В.]. – Вінниця : ПП «ГД «Едельвейс», 2017. – 804 с.
4. Сучасне рішення автоматизації вентиляції із системою управліннь «Розумний дім». SOWA. URL: <https://www.sowa.kiev.ua/blog-uk/sovremennoye-resheniye-avtomatizatsii-ventilyatsii/> (дата звернення: 11.06.2026).

Мацішина Олександра Романівна – студентка групи ЗАКІТР-24б, кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, e-mail: o.matsyshyna2024@pu.org.ua

Науковий керівник: **Дубовой Володимир Михайлович** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: v.m.dubovoy@vntu.edu.ua

Matsyshyna Oleksandra Romanivna student of group ЗАСІТР-24b, Department of Automation and Intelligent Information Technologies, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: o.matsyshyna2024@pu.org.ua

Scientific advisor: **Dubovoy Volodymyr Mykhailovych** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Control Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: v.m.dubovoy@vntu.edu.ua