

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ БАКА З ПІДГРІВОМ ВОДИ В СЕРЕДОВИЩІ SCILAB/XCOS

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розроблено комплекс моделей бака з підгрівом води, що включає вербальну, структурну, функціональні та імітаційну моделі. Структурна модель представлена у вигляді графа взаємозв'язків між потоками системи. Функціональні моделі описують динамічні та статичні характеристики гідродинамічного та термодинамічного процесів. Імітаційну модель реалізовано в середовищі Scilab/Xcos із врахуванням нелінійного взаємозв'язку між масою теплоносія та швидкістю нагріву. Результати моделювання підтверджують працездатність розробленої системи та ілюструють ефект демпфування температурних автоколиваний.

Ключові слова: бак з підгрівом води, імітаційна модель, Scilab/Xcos, релейне керування, гістерезис, динаміка, структурна модель.

Abstract

A complex of water heating tank models has been developed, including verbal, structural, functional and simulation models. The structural model is represented as a flow interaction graph. Functional models describe the dynamic and static characteristics of the hydrodynamic and thermodynamic processes. The simulation model is implemented in Scilab/Xcos, taking into account the nonlinear relationship between the coolant mass and the heating rate. Simulation results confirm the performance of the developed system and illustrate the damping effect of temperature self-oscillations.

Keywords: water heating tank, simulation model, Scilab/Xcos, on-off control, hysteresis, dynamics, structural model.

Вступ

У сучасних автоматизованих системах водопостачання та теплоенергетики значне місце посідають об'єкти з накопиченням рідини та її підгрівом. Дослідження та оптимізація таких об'єктів ускладнюється наявністю взаємозв'язку між гідродинамічними (зміна об'єму рідини) та термодинамічними (зміна кількості теплоти) процесами.

Імітаційне моделювання дозволяє досліджувати поведінку системи без фізичного прототипу, що суттєво спрощує процес проектування та аналізу. Однак побудова адекватної імітаційної моделі складного об'єкта вимагає детального опису всіх його підсистем та взаємозв'язків між ними [1, 2]. При цьому застосування спеціалізованих програмних середовищ, зокрема відкритої платформи Scilab/Xcos, дозволяє ефективно досліджувати такі динамічні процеси без створення фізичного прототипу [3].

Метою роботи є розробка комплексу моделей бака з підгрівом води, що включає вербальну, структурну, функціональні та імітаційну моделі, а також дослідження поведінки системи при різних режимах роботи засобами середовища Scilab/Xcos.

Вербальна модель

Бак з підгрівом води — це технологічний електромеханічний об'єкт, призначений для накопичення рідкого теплоносія та автоматичної підтримки його температури на заданому рівні в умовах безперервного потоку рідини. Система працює в автоматичному режимі за принципом зворотного зв'язку. На динаміку процесів частково впливають параметри навколишнього середовища.

Система складається з таких функціональних блоків:

- **Бак (ємність)** — конструктивний елемент для акумуляції маси рідини та теплової енергії. Поточний об'єм води визначає теплоємність об'єкта, яка безпосередньо впливає на швидкість термодинамічних процесів.
- **Електричний нагрівач (ТЕН)** — виконавчий елемент, що перетворює електричну енергію в тепловий потік. Нагрівач має власну теплову інерцію, через що передача тепла теплоносію відбувається із затримкою в часі.
- **Вхідний потік води** — матеріальний потік холодної рідини, що безперервно надходить у ємність. Створює постійне збурення, знижуючи загальну температуру суміші в баку.
- **Вихідний потік** — матеріальний потік нагрітої води, що відбирається з бака для технологічних потреб споживача.
- **Контролер (релейний регулятор)** — інформаційний блок, який здійснює двопозиційне керування ТЕНом. Він порівнює поточну температуру з еталоном і формує дискретні команди увімкнення або вимкнення живлення. Має зону нечутливості (гістерезис).
- **Датчик рівня та датчик температури** — безінерційні вимірювальні елементи, що забезпечують зняття поточних координат стану системи та передачу сигналів по колу зворотного зв'язку.

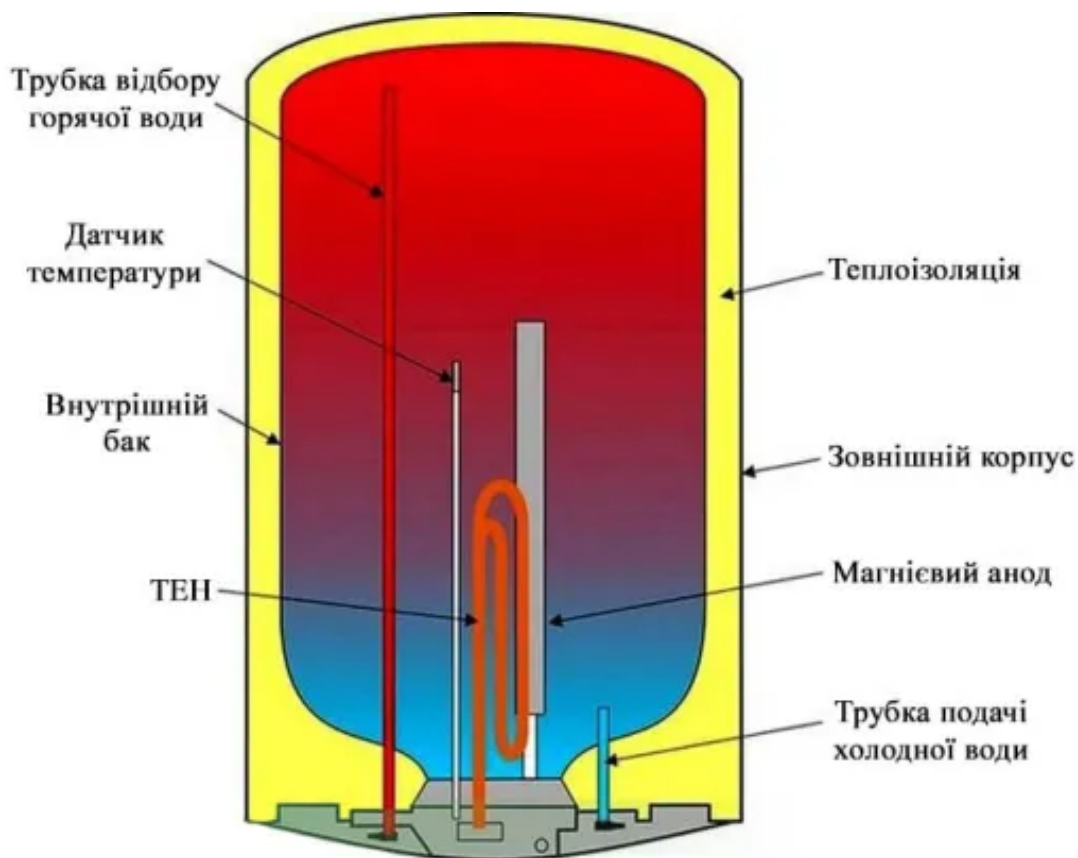


Рисунок 1 – Основні компоненти бака з підгрівом води[4]

Процес функціонування об'єкта включає дві основні фази:

- **Фаза 1 — Початкове наповнення та прогрів:** Характеризується нестационарними динамічними процесами, під час яких теплова інерція нагрівача долається потужністю ТЕНу, а рівень рідини починає лінійно зростати.
- **Фаза 2 — Квазістационарні автоколивання:** ТЕН періодично комутується контролером, утримуючи температуру в межах зони гістерезису, тоді як амплітуда і період коливань безперервно трансформуються під впливом збільшення загальної маси води.

Вплив навколишнього середовища. Температура повітря у приміщенні та початковий стан холодної води визначають статичні втрати тепла. Постійний відбір теплової енергії в навколишній простір через стінки ємності враховується як адитивне температурне збурення.

Структурна модель (граф)

Взаємозв'язки між інформаційними, матеріальними та енергетичними потоками системи автоматичного керування представлено у вигляді орієнтованого графа структури об'єкта (рис. 2).

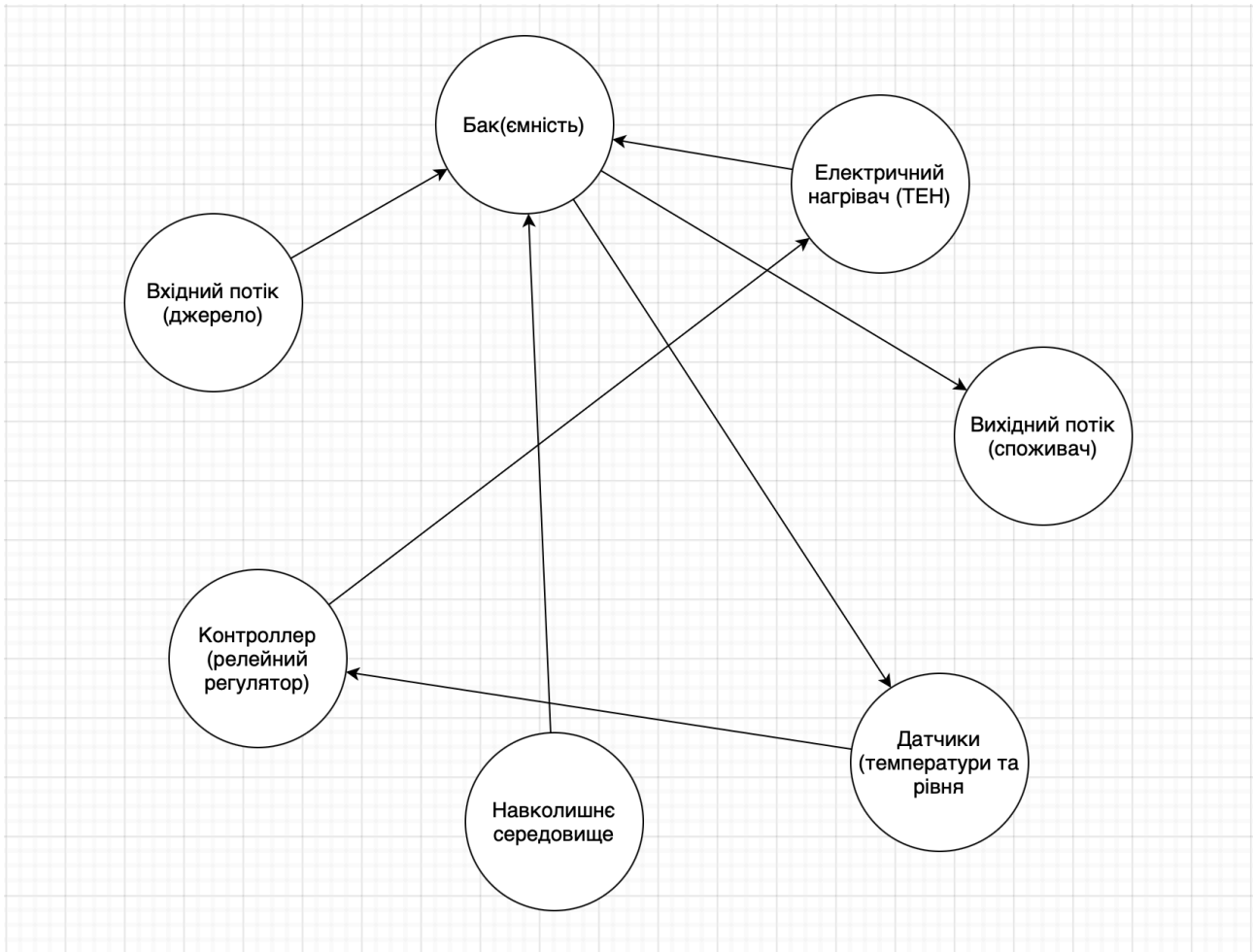


Рисунок 2 — Граф структурної моделі бака з підігрівом води

Функціональні моделі блоків

Для кожного функціонального блока системи визначено його тип (статичний чи динамічний) та сформовано відповідне математичне підґрунтя.

Контролер (релейний регулятор) є нелінійним статичним елементом, що миттєво обчислює помилку регулювання $e(t)$ та формує дискретний керуючий сигнал:

$$e(t) = T_{set} - T(t)$$

Гідродинамічний контур бака описується динамічною інтегруючою моделлю, де швидкість зміни рівня рідини визначається поточним балансом вхідного та вихідного потоків:

$$h(t) = h_0 + \frac{1}{A} \int (F_{in} - F_{out}) dt$$

де A – площа поперечного перерізу бака.

Електричний нагрівач (ТЕН) розглядається як динамічний блок, теплова інерція якого апроксимується передавальною функцією аперіодичної ланки першого порядку:

$$W(s) = \frac{1}{1 + T_h \cdot s}$$

де $T_h = 5\text{с}$ — стала часу розігріву спіралі ТЕНу.

Термодинамічний контур є багатозв'язним нелінійним динамічним блоком. Диференціальне рівняння теплового балансу враховує змінну масу рідини через дільник рівня $h(t)$:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_{heat}(t) - P_{loss}}{c \cdot \rho \cdot A \cdot h(t)}$$

де P_{heat} — потужність нагрівача (35 або 0 ум. од.); $P_{loss} = 15$ ум. од. — втрати на збурення від вхідного потоку холодної води; $c \cdot \rho \cdot A$ — конструктивний коефіцієнт теплоємності.

Датчики рівня та температури є пасивними статичними елементами з одиничними коефіцієнтами передачі:

$$T_{measured}(t) = T(t)$$

$$h_{measured}(t) = h(t)$$

Імітаційна модель у середовищі Scilab/Xcos

Імітаційну модель системи автоматичного керування баком реалізовано за допомогою блоків бібліотеки графічного візуального моделювання Xcos пакету Scilab (рис. 3).

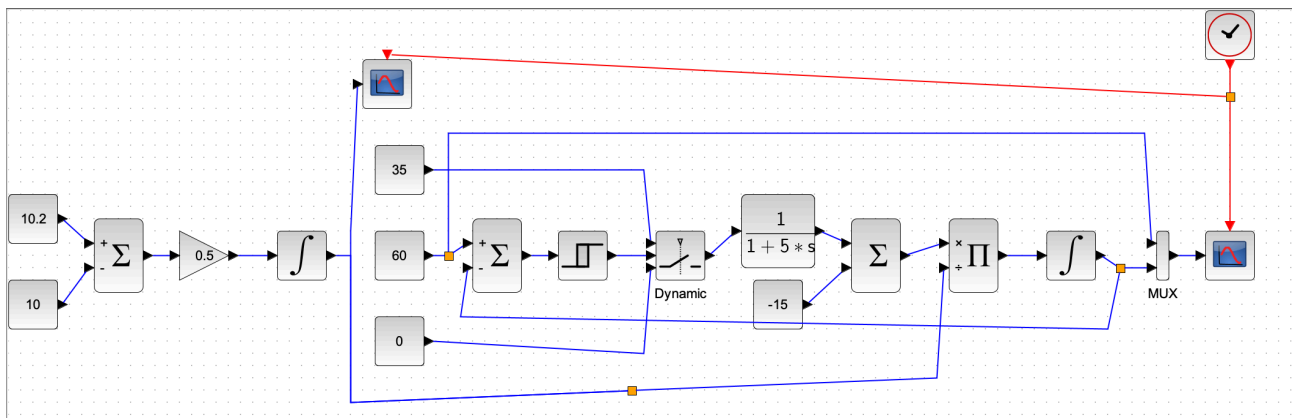


Рисунок 3 — Схема імітаційної моделі бака в середовищі Scilab/Xcos

Структура моделі інтегрує два головні контури. Гідродинамічний контур на основі інтегратора моделює зміну рівня води від початкового стану $h_0 = 1.0$ м при вхідному потоці $F_{in} = 10.2$ ум. од. та вихідному $F_{out} = 10$ ум. од. Термодинамічний контур містить реле з гістерезисом (± 2 °C) та уставкою $T_{set} = 60$ °C. Взаємозв'язок реалізовано через нелінійний блок ділення PRODUCT (Π), що ділить теплову потужність на поточне значення інтеграла рівня рідини. Результати комп'ютерного моделювання тривалістю 100 секунд представлено на рис. 4 та рис. 5.

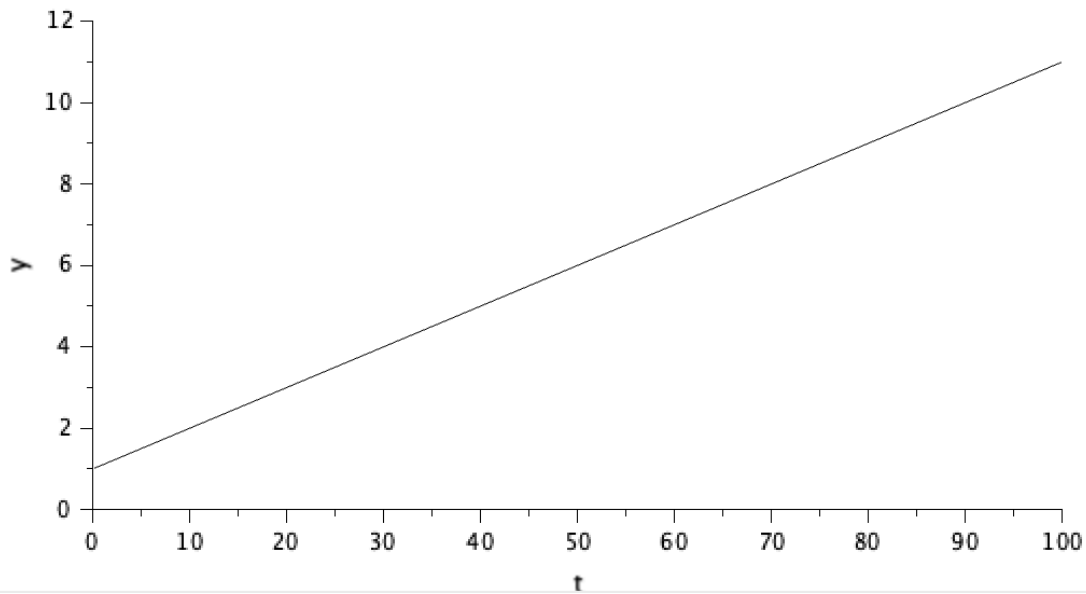


Рисунок 4 — Графік перехідного процесу температури води в баку

Як видно з рис. 4, рівень води в баку зростає за лінійним законом від початкового значення до 11 умовних одиниць внаслідок позитивного балансу між вхідним та вихідним потоками (10.2 проти 10 ум. од.). Цей процес збільшення маси теплоносія безпосередньо впливає на термодинаміку об'єкта.

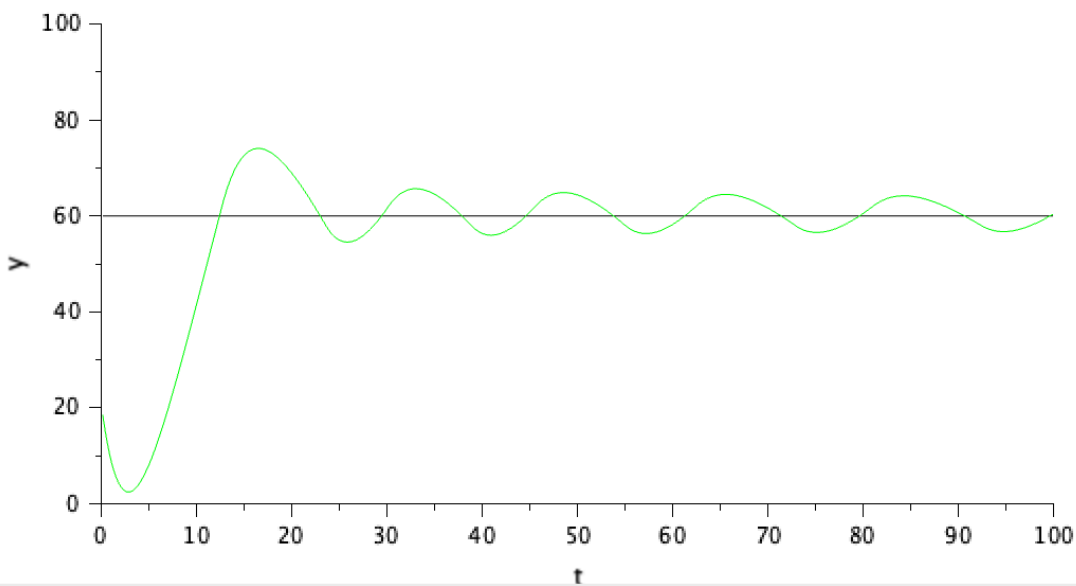


Рисунок 5 — Графік перехідного процесу температури води в баку

Аналіз часових характеристик підтверджує фізичну адекватність нелінійної моделі. На початковому етапі (0–15 с) спостерігається стартове просідання температури нижче початкових 20 °С, оскільки через інерційність ТЕНу ($T = 5$ с) тепловий потік наростає із затримкою, і вплив постійного припливу холодної води тимчасово переважає.

Після виходу на робочий режим система демонструє перше динамічне перерегулювання до рівня ~ 74 °С за рахунок скидання енергії, накопиченої в нагрівачі. Надалі система переходить у режим автоколивань навколо цільової позначки 60 °С. Завдяки введеному нелінійному зв'язку чітко відстежується ефект демпфування: у міру лінійного зростання рівня води (рис. 4) збільшується

загальна теплова маса об'єкта, внаслідок чого амплітуда коливань температури поступово згасає, а їх період розтягується у часі.

Висновки

У роботі розроблено комплекс моделей бака з підігрівом води в середовищі Scilab/Xcos. Побудовано вербальну модель, що описує принципи функціонування системи, та структурну модель у вигляді графа взаємозв'язків. Для функціональних блоків визначено тип моделі та отримано відповідні математичні описи, які інтегровано в єдину імітаційну систему.

Комп'ютерне моделювання підтвердило адекватність побудованої структури: графіки наочно продемонстрували затримку розігріву через інерцію ТЕНу та ефект затухання амплітуди автоколивань внаслідок лінійного збільшення загальної теплоємності системи. Розроблений комплекс моделей може бути використаний для проєктування та налаштування промислових систем керування без необхідності створення фізичного прототипу.

Список використаної літератури

1. Моделювання та оптимізація систем : підручник / [Дубовой В. М., Кветний Р. Н., Михальов О. І., Усов А. В.]. – Вінниця : ПП «ТД «Едельвейс», 2017. – 804 с.
2. Дубовой В. М. Моделювання процесів і систем керування : навчальний посібник / В. М. Дубовой, С. М. Москвіна, О. Д. Никитенко. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 202 с.
3. Зайцев М. О. Моделювання динамічних систем у середовищі Scilab/Xcos : метод. вказівки / М. О. Зайцев. – Дніпро : НТУ «ДП», 2020. – 88 с.
4. Принцип роботи бойлерів. URL: <https://teploradost.com.ua/ua/article/bojlery-printsip-raboty> (дата звернення: 27.05.2026).

Громик Микола Олегович — студент групи ІАКІТР-246, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: 01-24-050.stud@vntu.edu.ua

Науковий керівник: **Дубовой Володимир Михайлович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Mykola Gromyk — Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: 01-24-050.stud@vntu.edu.ua

Supervisor: **Volodymyr Dubovoy** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Control Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia