

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

Вінницький національний технічний університет

## Анотація

Розроблено комплекс моделей бака з підгрівом води для накопичення та підтримання заданої температури в автоматичному режимі. Побудовано вербальну, структурну, функціональну та імітаційну моделі системи. Імітаційну модель реалізовано в середовищі Scilab/Xcos з використанням релейного керування нагрівачем, який підтримує температуру поблизу 50 °С. Результати моделювання підтвердили працездатність системи та показали зміну температури і рівня води під час роботи.

**Ключові слова:** бак з підгрівом води, теплообмінник, імітаційна модель, Scilab/Xcos, релейне керування, гістерезис, датчик температури, датчик рівня, гідродинамічний контур, термодинамічний контур.

## Abstract

A set of models of a water heating tank with automatic temperature control was developed. Verbal, structural, functional, and simulation models of the system were created. The simulation model was implemented in Scilab/Xcos using on-off heater control to maintain the water temperature near 50 °C. The simulation results confirmed the operability of the system and demonstrated the behavior of water level and temperature during operation.

**Keywords:** water heating tank, heat exchanger, simulation model, Scilab/Xcos, on-off control, hysteresis, temperature sensor, level sensor, hydrodynamic circuit, thermodynamic circuit.

## Вступ

У сучасних автоматизованих системах водопостачання широко використовуються баки для накопичення та підгріву води. Такі об'єкти забезпечують подачу води із заданою температурою та потребують контролю рівня, температури і роботи нагрівального елемента. Їх дослідження ускладнюється тим, що одночасно відбуваються гідродинамічні процеси, пов'язані зі зміною рівня води, та теплові процеси, пов'язані з її нагріванням.

Імітаційне моделювання дає змогу дослідити поведінку бака без створення фізичного прототипу. За допомогою моделі можна проаналізувати процес наповнення ємності, вплив вхідного і вихідного потоків води, а також роботу нагрівача при автоматичному підтриманні температури. Для цього доцільно використовувати середовище Scilab/Xcos, яке дозволяє наочно будувати структурні та імітаційні моделі динамічних систем.

Метою роботи є розробка комплексу моделей бака з підігрівом води, що включає вербальну, структурну, функціональні та імітаційну моделі, а також дослідження роботи системи під час наповнення бака і підтримання температури води в межах 45–55 °C із заданим значенням 50 °C.

### Вербальна модель

Бак з підігрівом води — це технологічний об'єкт, призначений для накопичення води та підтримання її температури на заданому рівні. Нагрівання води здійснюється за допомогою внутрішнього теплообмінника у вигляді зміювика, через який проходить гарячий теплоносій. Система працює в автоматичному режимі за принципом зворотного зв'язку, використовуючи дані з датчиків температури та рівня.

Система складається з таких функціональних блоків:

- **Бак (ємність)** - основний конструктивний елемент для накопичення води. Поточний рівень води визначає об'єм рідини в баку та впливає на швидкість її нагрівання.
- **Теплообмінник (зміювик)** - нагрівальний елемент системи, через який проходить гарячий теплоносій. Він передає теплову енергію воді в баку без прямого змішування теплоносія з основною водою.
- **Вхідний потік води** - потік холодної води, що надходить у бак і збільшує рівень рідини. Надходження холодної води може знижувати загальну температуру в ємності.
- **Вихідний потік води** - потік підігрітої води, що відбирається з бака для потреб споживача.
- **Контролер (релейний регулятор)** - інформаційний блок, який керує процесом нагрівання. Він порівнює поточну температуру із заданим значенням 50 °C і формує команду на ввімкнення або вимкнення нагріву. При температурі 45 °C нагрів вмикається, а при 55 °C - вимикається.
- **Датчик температури та датчик рівня** - вимірювальні елементи, які контролюють стан системи. Датчик температури визначає поточну температуру води, а датчик рівня відстежує наповнення бака.

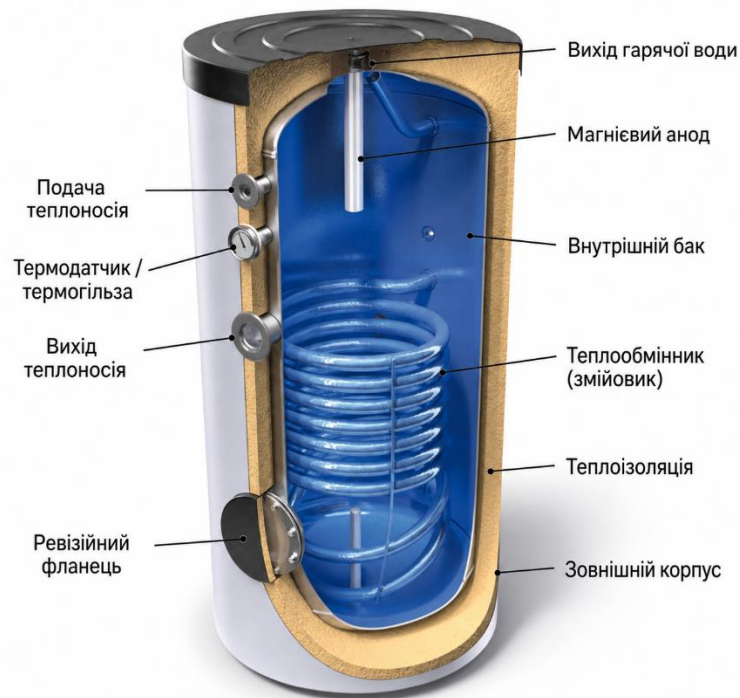


Рисунок 1 – Основні компоненти бака з підігрівом води з теплообмінником

Процес функціонування об'єкта включає дві основні фази:

- **Фаза 1** - Початкове наповнення та нагрів: характеризується нестационарними процесами, під час яких у бак надходить холодна вода, рівень рідини поступово зростає, а теплообмінник починає передавати теплову енергію воді.
- **Фаза 2** - Автоматичне підтримання температури: система переходить у режим регулювання, за якого контролер керує подачею тепла через теплообмінник. При зниженні температури до 45 °С нагрів вмикається, а при досягненні 55 °С - вимикається, що дозволяє підтримувати температуру біля заданого значення 50 °С.

На роботу системи впливають температура вхідної холодної води, витрата води на виході та теплові втрати через стінки бака. Теплоізоляція зменшує ці втрати, однак у моделі вони враховуються як додаткове температурне збурення.

### Структурна модель (граф)

Взаємозв'язки між інформаційними, матеріальними та енергетичними потоками системи автоматичного керування представлено у вигляді орієнтованого графа структурної моделі об'єкта (рис. 2). У графі відображено взаємодію бака, теплообмінника, вхідного та вихідного потоків води, датчиків температури і рівня, контролера та навколишнього середовища.

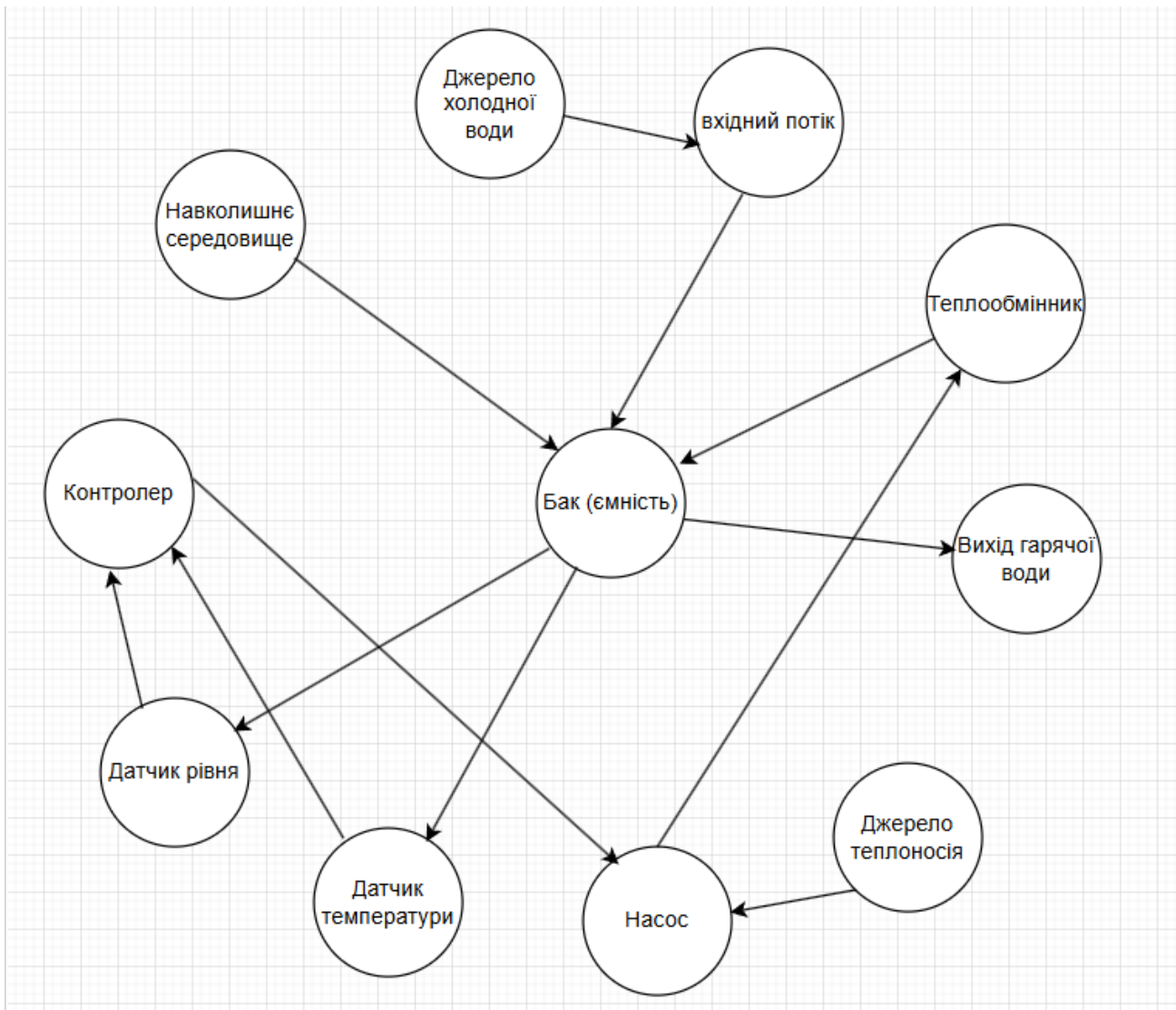


Рисунок 2 - Граф структурної моделі бака з підігрівом води з теплообмінником

### Функціональні моделі блоків

Для кожного функціонального блока системи визначено його тип та сформовано відповідне математичне підґрунтя. Основними процесами в моделі є зміна рівня води в баку, нагрівання води через теплообмінник та автоматичне керування подачею тепла.

Контролер є нелінійним статичним елементом, який порівнює поточну температуру води із заданим значенням та формує керуючий сигнал:

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

де  $T_{set} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  - задана температура води,  $T(t)$  - поточна температура в баку.

Керування нагріванням здійснюється за релейним законом з гістерезисом:

$$u(t) = 1, \text{ якщо } T(t) \leq 45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$u(t) = 0, \text{ якщо } T(t) \geq 55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

де  $u(t)=1$  - нагрівання увімкнено,  $u(t)=0$  - нагрівання вимкнено. У проміжку  $45 \text{ } ^\circ\text{C} < T(t) < 55 \text{ } ^\circ\text{C}$  стан нагрівання не змінюється.

Гідродинамічний контур бака описується інтегруючою моделлю. Швидкість зміни рівня води визначається різницею між вхідним і вихідним потоками:

$$h(t) = h^0 + \frac{1}{A} \int (F_{in} - F_{out}) dt$$

де  $h_0$  - початковий рівень води в баку,  $A$  - площа поперечного перерізу бака,  $F_{in} = 25.5$  - вхідний потік води,  $F_{out} = 25$  - вихідний потік води.

У моделі також використано обмеження максимального рівня води:

$$h(t) \leq h_{max}$$

$h_{max} = 25$  максимальний рівень заповнення бака.

Теплообмінник розглядається як динамічний блок першого порядку, оскільки передача тепла від теплоносія до води відбувається з певною інерційністю:

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

де  $T_h = 10$  с - стала часу теплообмінного контуру.

Термодинамічний контур описує зміну температури води в баку. Температура залежить від теплової потужності, що передається через теплообмінник, теплових втрат та поточного рівня води:

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

де  $P_{heat(t)}$  - тепла потужність, що надходить від теплообмінника,  $P_{loss} = 15$  - теплові втрати,  $c \cdot \rho \cdot A$  - конструктивний коефіцієнт теплоємності,  $h(t)$  - поточний рівень води в баку.

Датчики температури та рівня розглядаються як пасивні статичні елементи 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 з підігрівом води реалізовано за допомогою блоків бібліотеки графічного візуального моделювання Xcos пакету Scilab (рис. 3).

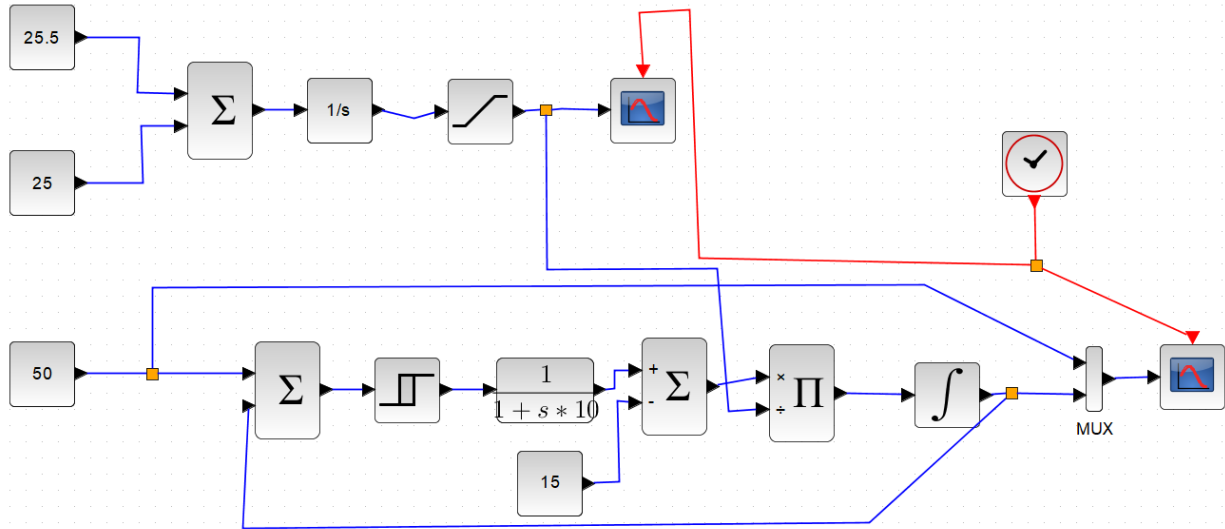


Рисунок 3 — Структура імітаційної моделі бака з підігрівом води в середовищі Scilab/Xcos

Структура моделі об'єднує гідродинамічний, теплообмінний, термодинамічний контури та контур керування. Гідродинамічний контур на основі інтегратора моделює зміну рівня води в баку при вхідному потоці ( $F_{in} = 25.5$ ) ум. од. та вихідному потоці ( $F_{out} = 25$ ) ум. од. Оскільки вхідний потік є більшим за вихідний, рівень води поступово зростає, а після досягнення заданого обмеження стабілізується.

Теплообмінний контур описує передачу теплової енергії до води в баку. Інерційність процесу нагрівання враховано аперіодичною ланкою першого порядку зі сталою часу ( $T_h = 10$ ) с. Термодинамічний контур моделює зміну температури води з урахуванням теплової потужності, теплових втрат ( $P_{loss} = 15$ ) ум. од. та поточного рівня води в баку.

Система керування містить релейний регулятор з гістерезисом. Задана температура становить ( $T_{set} = 50^{circ}C$ ). При зниженні температури до  $45^{circ}C$  нагрівання вмикається, а при досягненні  $55^{circ}C$  - вимикається. Результати комп'ютерного моделювання представлено на рис. 4 та рис. 5.

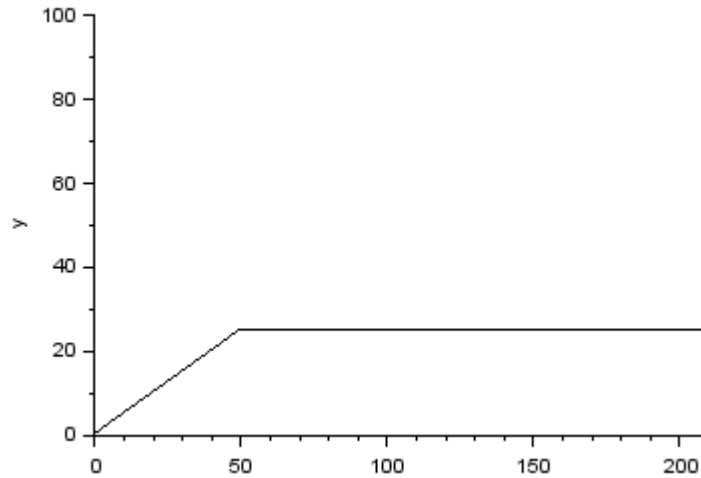


Рисунок 4 — Графік набору води в бак.

Як видно з рис. 4, рівень води в баку спочатку зростає майже за лінійним законом. Це пояснюється тим, що вхідний потік води ( $F_{in} = 25.5$ ) ум. од. є трохи більшим за вихідний потік ( $F_{out} = 25$ ) ум. од. Через позитивну різницю потоків бак поступово наповнюється. Після досягнення приблизно 25 умовних одиниць рівень води стабілізується та надалі залишається майже незмінним. Це пов'язано з обмеженням максимального рівня в моделі, яке імітує заповнення бака до допустимого значення.

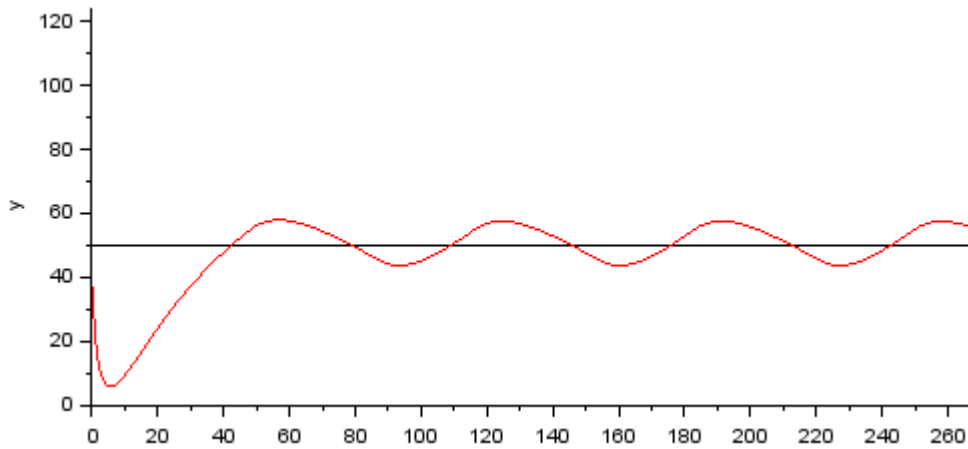


Рисунок 5 — Графік зміни температури води в баку при релейному керуванні нагріванням

На рис. 5 показано зміну температури води в баку під час роботи системи автоматичного керування. На початку моделювання температура знижується через надходження холодної води та інерційність теплообмінного контуру. Передача тепла до води відбувається із затримкою, тому на початковій ділянці охолоджувальний вплив вхідного потоку переважає.

Після цього температура починає поступово зростати. Під час наповнення бака збільшується кількість води, тому процес нагрівання відбувається плавно. Перше вимкнення нагрівання відбувається після заповнення бака та досягнення температури верхньої межі регулювання.

У подальшому система переходить у режим автоматичного підтримання температури поблизу заданого значення 50 °С. Коли температура знижується до нижньої межі, нагрівання вмикається, а після досягнення верхньої межі — вимикається. Через інерційність теплообмінника температура змінюється коливально, що й спостерігається на графіку.

## Висновки

Комп'ютерне моделювання підтвердило працездатність побудованої імітаційної моделі. Графік рівня води демонструє процес наповнення бака та подальшу стабілізацію після досягнення заданого обмеження. Графік температури показує роботу системи автоматичного підігріву: спочатку відбувається наповнення бака та поступове нагрівання води, після чого система переходить у режим релейного регулювання.

Отримані результати показують, що система здатна підтримувати температуру води поблизу заданого значення 50 °С за рахунок вмикання та вимикання нагрівання в межах гістерезису. Розроблена модель може бути використана для аналізу роботи бака з підігрівом води та налаштування параметрів автоматичного керування без 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. Scilab. Xcos: dynamic systems modeler and simulator. URL: <https://www.scilab.org/software/xcos> (дата звернення: 05.06.2026).
4. Cadafalch J. Modelling of storage tanks with immersed heat exchangers / J. Cadafalch. – 2015. URL: <https://upcommons.upc.edu/bitstreams/b41320bc-8984-493f-8486-38d1b0fcb57e/download> (дата звернення: 05.06.2026).
5. Xcos for beginners – tutorial. Scilab. URL: <https://www.scilab.org/xcos-for-beginners-tutorial> (дата звернення: 05.06.2026).
6. Бойлер непрямого нагріву: пристрій, принцип роботи і вибір. URL: <https://bakilux.com/ua/blog/bojler-непрямого-нагриву-pristrij-printsip-roboti-i-vibir/> (дата звернення: 05.06.2026).

**Найдорф Олексій Володимирович** – студент групи ЗАКІТР-246, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [onajdorf@gmail.com](mailto:onajdorf@gmail.com)

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

**Naidorf Oleksii** - Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [onajdorf@gmail.com](mailto:onajdorf@gmail.com)

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