

# ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 62-533.66

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/01>

## **Батюк С.Г.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## **Васянович В.М.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## **Воронюк М.В.**

Київський індустріальний фаховий коледж  
Київського національного університету будівництва та архітектури

## **Ворошилов А.І.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ІНВАРІАНТНІ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ І УНІВЕРСАЛЬНІ СТРУКТУРИ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ В ІМІТАЦІЙНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

*Стаття присвячена імітаційному моделюванню сучасних теплоенергетичних систем автоматичного регулювання. Сучасні теплоенергетичні агрегати є складними технічними об'єктами, які вимагають високого рівня автоматизації для забезпечення стабільної та ефективної роботи. Операційна ефективність теплоенергетичних систем автоматичного регулювання безпосередньо впливає на економічність, ефективність, продуктивність і надійність теплоенергетичних технологічних об'єктів управління. Імітаційне моделювання є важливим інструментом для аналізу, проєктування та оптимізації операційної ефективності теплоенергетичних систем автоматичного регулювання.*

*У статті визначено, що важливими (навіть принциповими) є дві задачі структурного імітаційного моделювання: 1) моделювання об'єктів управління (або технологічного об'єкту управління як сукупності об'єктів управління) в системі комп'ютерної математики або в ПЛК; 2) реалізація універсальних структур ПІД-регуляторів в ПЛК. В статті викладені результати виконаних на кафедрі автоматизації енергетичних процесів досліджень саме з цих вказаних проблем.*

*Розроблена і досліджена модель універсального об'єкту управління для імітаційного функціонального і структурного моделювання теплоенергетичного технологічного об'єкту управління. Мета дослідження – розробка універсальної моделі об'єкту управління, яка є інваріантною (малочутливою) до параметричних збурень системи автоматичного регулювання, для моделювання теплоенергетичного технологічного об'єкту управління в типовій системі комп'ютерної математики і в типовому ПЛК.*

*Розроблені і досліджені універсальні структури ПІД-регуляторів для імітаційного функціонального і структурного моделювання теплоенергетичного технологічного об'єкту управління. Мета дослідження: 1) розробка універсальної структури аналогового ПІД-регулятора з незалежними П-, І- і Д-частинами (ПІД-регулятор може бути редукований до ПД- та ІД-регулятору), який в комплекті з аналоговим виконавчим механізмом реалізує ПІД-закон регулювання; 2) розробка універсальної структури релейно-імпульсного ПІД-регулятора (ДПД2-регулятору з часо-імпульсною*

модуляцією), який в комплекті з трипозиційним виконавчим механізмом реалізує аналоговий ПІД-закон регулювання.

**Ключові слова:** *теплова енергетика, технологічний об'єкт управління, кібер-фізична система, автоматизована система управління, система автоматичного регулювання, інформаційно-вимірювальна система, система програмно-логічного управління, автоматизація технологічних процесів, програмно-технічні засоби автоматизації, контролерна функціональність, супервізорна функціональність, ПІД-регулятор, цифровий двійник, граничний девайс, інтернет речей, імітаційне моделювання, функціональне моделювання, структурне моделювання.*

**Постановка проблеми.** Сучасні теплоенергетичні агрегати є складними технічними об'єктами, які вимагають високого рівня автоматизації для забезпечення стабільної та ефективної роботи.

Теплоенергетичний технологічний об'єкт управління (ТОУ) – технологічний агрегат (піч, котел, інженерна система життєзабезпечення будівлі тощо), який автоматизується. АСУТП (або просто АСУ) – автоматизована система управління технологічними процесами. Автоматизований технологічний комплекс (АТК) – ТОУ, керований АСУ. ТОУ – комплекс ОУ (каналів передачі дії «зміна регульовальної дії – зміна регульованого параметру»). АСУ – комплекс автоматичних систем регулювання (АСР). АТК – комплекс САР режимних параметрів. АТК – кібер-фізична система (КФС). Теплоенергетична САР – САР режимного параметру теплоенергетичного ОУ. Теплоенергетичні ОУ в складі теплоенергетичного ТОУ – це «повільні» і «дуже повільні» ОУ (аперіодичні ланки високого порядку; бак з рідиною – інтегральна ланка). Сучасні автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУТП; надалі просто АСУТП або АСУ) ТОУ є дворівневими. Програмно-технічною платформою контролерного (нижнього) рівня АСУ є програмовані логічні контролери (ПЛК). Бізнес-логіка (неперервне регулювання і програмно-логічне управління) в ПЛК реалізується функціональними блоками (ФБ). Програмно-технічною платформою супервізорного (верхнього) рівня АСУ є НМІ/SCADA-системи (надалі системи ЛМІ – людинно-машинного інтерфейсу). Візуалізація в ЛМІ реалізується графічними вікнами з вставленими і анімованими графічними елементами і контролами (меню, мнемосхеми, аларми, тренди, рецепти, розклади, звіти тощо). Сучасна АСУ (як сукупність АСР) функціонально структурується на дві підсистеми: інформаційно-вимірювальну систему (ІВС) і регульовально-виконавчу систему (РВС). ІВС – сукупність вимірювальних каналів (ВК) технологічних параметрів (сенсори або давачі Д; реєструючі прилади РП; вхідні модулі ПЛК). РВС – сукупність регульовально-виконавчих каналів (РВК) технологічних параметрів (ФБ

в ПЛК; вихідні модулі ПЛК; актуатори або виконавчі механізми ВМ; блоки ручного управління БРУ для вибору режимів автоматичного (від ПЛК) або ручного і дистанційного управління з пульта оператора ВМ в ручному режимі; регулюючі органи РО). Програмно-технічні комплекси засобів автоматизації (ПТК) АСР – сукупність ВК і РВК в складі АСР (коректно буде також сказати – в складі САР). Сучасні ПТК є трирівневі: нижній рівень автоматизації – контролерний рівень; на супервізорному рівні виділяються програмні серверний і клієнтський рівні автоматизації.

Операційна ефективність теплоенергетичних САР безпосередньо впливає на економічність, ефективність, продуктивність і надійність теплоенергетичних ТОУ.

Імітаційне моделювання є важливим інструментом для аналізу, проектування та оптимізації операційної ефективності теплоенергетичних САР.

Імітаційне моделювання – це програмне (не фізичне і не математичне) моделювання (імітація) фізичних (реальних) активів. Ефективність імітаційного моделювання визначається можливістю реалізувати налагодження і випробування промислової САР в робочих умовах ще до інсталяції розробленої системи автоматизації на майданчику замовника; тобто, фактично, на стадії робочого проектування перед впровадженням і потім на стадії модернізації перед тиражуванням. Таку можливість випробування розробленої системи автоматизації в робочих умовах дає моделювання реального технологічного процесу в системі комп'ютерної математики і використання змодельованого технологічного процесу замість реального фізичного технологічного процесу. Розробник системи автоматизації може перевірити і налагодити контролерну і супервізону функціональності системи автоматизації ще до інсталяції її на майданчику замовника – на розробленій комп'ютерній моделі технологічного процесу. Реалізація такого структурного моделювання потребує вирішення певних програмно-технічних задач (обмін даними Модель – ПЛК – НМІ/SCADA-система) і певних задач в моделюванні

технологічного процесу в системі комп'ютерної математики (правильна апроксимація динаміки технологічних процесів). Функціональне імітаційне моделювання динамічної системи імітує функції, які вона виконує, тоді як структурне імітаційне моделювання імітує взаємодію між різними структурними компонентами системи. Імітаційне моделювання АТК є ефективним інструментом для перевірки працездатності та налаштування АСУ, особливо в ситуаціях, коли відсутній доступ до реальних фізичних ТОУ, і неможливо провести аналіз динаміки систем автоматичного регулювання з використанням складних математичних моделей. Це моделювання застосовується на етапах проектування (розробки та програмування), впровадження, серійного виробництва та модернізації АСУ. Моделювання ТОУ може здійснюватися або в системі комп'ютерної математики (СКМ), або безпосередньо в ПЛК. Людино-машинний інтерфейс (ЛМІ) реалізується через зовнішню SCADA-систему або НМІ-панель, інтегровану в сам ПЛК. ПЛК може бути як апаратним (хардПЛК), так і програмним (софтПЛК), що реалізується на комп'ютері.

Вирізняють:

1. імітаційне SIL-моделювання АТК (Software-In-the-Loop: софтПЛК в колі зворотного зв'язку; модель ТОУ реалізована в СКМ; ЛМІ – зовнішня SCADA-система);

2. імітаційне HIL-моделювання АТК (Hardware-In-the-Loop: хардПЛК в колі зворотного зв'язку; модель ТОУ реалізована прямо в хардПЛК; ЛМІ – НМІ-панель самого хардПЛК);

3. імітаційне VIL-моделювання АТК (Viewer-In-the-Loop: модель ТОУ, ПЛК і ЛМІ реалізовані в НМІ/SCADA-системі).

Функціональне імітаційне моделювання – моделювання функціональності замкнених САР в СКМ Matlab Simulink.

Структурне імітаційне моделювання – моделювання структурних компонентів АСУТП на полігоні імітаційного SIL-моделювання на платформі СКМ – софтПЛК або хардПЛК – НМІ/SCADA-система.

Важливими (навіть принциповими) є дві задачі структурного імітаційного моделювання: 1) моделювання ОУ (або ТОУ як сукупності ОУ) в СКМ або в ПЛК; 2) реалізація універсальних структур ПІД-регуляторів в ПЛК. Актуальними є розробки і дослідження саме з цих вказаних проблем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Актуальність публікацій з тематики статті може бути визначена за наступними напрямками:

1. Імітаційне функціональне і структурне моделювання активно практикується для створення дослідницьких полігонів, програмно-технічних симуляторів і тренажерів, в тому числі і спеціалістами провідних вишів України.

Розроблений на кафедрі автоматизації енергетичних процесів (АЕП) НТУУ КПІ полігон імітаційного моделювання дає можливість реалізувати функціональне імітаційне моделювання (моделювання функцій і перехідних процесів замкнених САР) і структурне імітаційне моделювання (взаємодію контролерної і супервізорної функціональності, реалізованих реальними ПЛК і НМІ/SCADA-системами, з технологічним процесом, змодельованим в СКМ) теплоенергетичних САР. Полігоні SIL-моделювання розроблений на платформі СКМ Matlab Simulink – софтПЛК CoDeSys – НМІ/SCADA-система WebStudio. Результати робіт, висновки і рекомендації із застосування розроблених рішень викладені в монографії [1].

2. Питання адекватності моделі ОУ реальному ОУ і малочутливості (інваріантності) моделі ОУ до параметричних збурень САР (добовий, сезонний і віковий дрейфи параметрів ОУ) є актуальними для задач синтезу (в тому числі з використанням методів імітаційного моделювання) адаптивних САР з еталонними моделями ОУ [2].

3. Питання реалізації в СКМ і в ПЛК універсальної структури аналогового ПІД-регулятора (який може бути редукований до П-, І- і Д-регуляторів) і універсальної структури релейно-імпульсного ДПІД<sup>2</sup>-регулятора з часо-імпульсною модуляцією (який, в комплекті з трипозиційним ВМ – інтегратором – реалізує аналоговий ПІД-закон регулювання), питання розрахунку налагоджень ПІД-регулятора і адаптації параметрів ПІД-регулятора до параметричних збурень САР (добовий, сезонний і віковий дрейфи параметрів ОУ) є актуальними для задач синтезу адаптивних САР [3].

При імітаційному моделюванні промислових САР виникають наступні питання:

1. Чи адекватно (коректно і достатньо) апроксимувати теплоенергетичний ОУ (ОУ з великим перехідним запізненням) послідовним з'єднанням аперіодичної ланки 1-го або 2-го порядку і ланки транспортного запізнення (тобто, апроксимувати перехідне запізнення теплоенергетичного ОУ транспортним запізненням, якого в теплоенергетичному ОУ ніколи немає)?

2. Що таке взагалі «адекватна» модель теплоенергетичного ОУ (тобто, що таке «адекватна» апроксимація перехідного запізнення теплоенер-

гетичного ОУ транспортним запізненням, якого в теплоенергетичному ОУ ніколи немає)?

3. Як моделювати замкнену теплоенергетичну САР – обов'язково з «реальною» моделлю ОУ (яка реально адекватна ОУ) чи можна з «нереальною» («неадекватною») апроксимованою моделлю ОУ (в якій перехідне запізнення апроксимується транспортним запізненням)?

4. Як реалізувати в ПЛК ПІД-регулятор (ПІ-закон є оптимальним для типового статичного ОУ), який, за необхідності, може бути редукований до П-регулятора (який є оптимальним для астатичного ОУ) або до І-регулятора (який є оптимальним для статичного ОУ з великим перехідним запізненням)?

5. Як реалізувати в ПЛК ФБ ДПІД<sup>2</sup>-закону регулювання, який в комплекті з трипозиційним ВМ (який апроксимується інтегратором) реалізує ПІД-закон регулювання?

#### Постановка завдання.

1. Розробити і дослідити модель універсального ОУ для імітаційного функціонального і структурного моделювання теплоенергетичного ТОУ. Мета дослідження – розробка універсальної моделі ОУ, яка є інваріантною (малочутливою) до параметричних збурень САР, для моделювання теплоенергетичного ТОУ в типовій СКМ і в типовому ПЛК.

2. Розробити і дослідити універсальні структури ПІД-регуляторів для імітаційного функціонального і структурного моделювання теплоенергетичного ТОУ. Мета дослідження: 1) розробка універсальної структури аналогового ПІД-регулятора з незалежними П-, І- і Д-частинами (ПІД-регулятор може бути редукований до ПД- та ІД-регулятору), який в комплекті з аналоговим ВМ реалізує ПІД-закон регулювання; 2) розробка універсальної структури релейно-імпульсного ПІД-регулятора (ДПІД<sup>2</sup>-регулятору з часо-імпульсною модуляцією), який в комплекті з трипозиційним ВМ реалізує аналоговий ПІД-закон регулювання.

#### Виклад основного матеріалу.

##### Моделювання і дослідження

В імітаційному моделюванні використовуються лінійні ОУ, лінійні регулятори і, відповідно, лінійні САР.

Лінійні ОУ/САР – це ОУ/САР, для яких виконується принцип суперпозиції. Принцип суперпозиції – реакція ОУ/САР на сигнальне збурення є сумою реакцій ОУ/САР на елементарні типові збурення, сумою яких є це сигнальне збурення (на які це сигнальне збурення може бути розкладене). Практично це означає, що параметри ОУ/САР

не залежать від амплітуд регулювальної дії, збурень і регульованого параметру (і його похідних). Найважливіший принцип, так як він теоретично і практично забезпечує відтворюваність результатів розрахунку, моделювання і налагодження в практичній реалізації (незалежність якості перехідних процесів від амплітуд регулювальної дії і збурень – час перехідних процесів завжди однаковий, амплітуди коливань перехідних процесів еквівалентні). Промислово роботоздатні тільки лінійні САР. Основним регулятором лінійної САР є класичний ПІД-регулятор, який є оптимальним регулятором для лінійних ОУ.

Нелінійні САР (нелінійні диференціальні або різницеві рівняння; параметри ОУ залежать від амплітуд регулюючої дії, збурень і регульованого параметру і його похідних) промислово нероботоздатні, так як результати розрахунку, моделювання і налагодження не є відтворюваними в практичній реалізації (залежність якості перехідних процесів від амплітуд регулювальної дії і збурень – час перехідних процесів завжди різний, амплітуди коливань перехідних процесів нееквівалентні). Єдиний виняток – одноконтурна САР з двопозиційним релейним регулятором. В такій САР сталим режимом роботи є автоколивання (негармонійні і несинусоїдальні коливання), амплітуда і період яких можуть змінюватись, але ніколи не може бути перехідного процесу, що розходиться.

В промисловості практично використовуються виключно лінійні САР з ПІД-регуляторами. В промисловості релейні САР використовуються тільки тоді, коли АТК має багато САР і дешевше реалізувати релейні САР, ніж лінійні з ПІД-регуляторами (економія на сенсорах, актуаторах і кваліфікованих програмістах ПЛК і кваліфікованих налагоджувачах САР).

Принциповим є розмежування понять ТОУ і ОУ. ТОУ – це технологічний агрегат (піч, котел, інженерна система життєзабезпечення). ОУ – це канал передачі регулювальної дії на регульований параметр (канал «зміна регулювальної дії – зміна регульованого режимного параметру»). ТОУ – це сукупність ОУ. ТОУ – різні, але ОУ – типові, що і робить автоматизацію типовою, а не кожний раз для нового ТОУ унікальною.

Всі типові ОУ підрозділяються на статичні і астатичні. Статичний ОУ (ОУ з самовирівнюванням) – це ОУ, регульований параметр якого, при стрибкоподібному збуренні зі сторони РО, виходить на нове постійне значення. Астатичний ОУ (ОУ без самовирівнювання) – це ОУ, регульований параметр якого, при стрибкоподібному збуренні зі



сторони РО, неперервно рівномірно змінюються і ніколи не виходить на нове постійне значення.

На рисунках 1–4 наведені структура статичного ОУ, стрибкоподібне збурення зі сторони ОУ, крива розгону ОУ і апроксимована перехідна характеристика статичного ОУ.

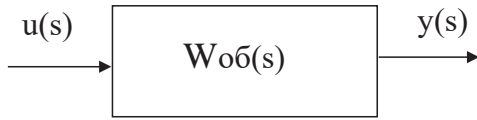


Рис. 1. Структура статичного ОУ

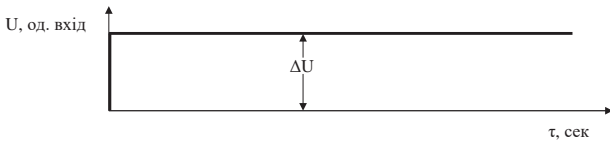


Рис. 2. Стрибокподібне збурення для ОУ зі сторони РО

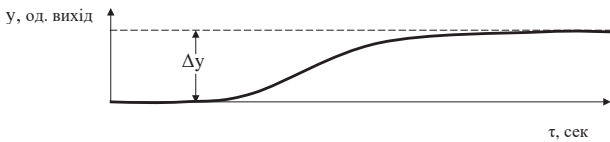


Рис. 3. Крива розгону статичного ОУ

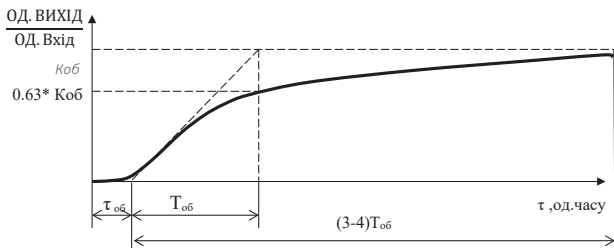


Рис. 4. Апроксимована перехідна характеристика статичного ОУ

Коефіцієнт передачі статичного ОУ розраховується за формулою (1).

$$K_{об} = \frac{\Delta y}{\Delta u}, \quad (1)$$

де  $K_{об}$  – коефіцієнт передачі ОУ,  $\frac{од. \text{вихід}}{од. \text{вхід}}$ ;

$\Delta y$  – зміна вихідного сигналу, од. вихід;

$\Delta u$  – зміна вхідного сигналу, од. вхід.

Якщо  $0 \leq \tau \leq \tau_{об}$ , то  $h(\tau) = 0$ , якщо  $\tau > \tau_{об}$ , то апроксимована перехідна характеристика статичного ОУ розраховується за формулою (2). В свою чергу, апроксимована передавальна функція статичного ОУ розраховується за формулою (3).

$$h(\tau) = K_{об} * \left( 1 - e^{-\frac{\tau - \tau_{об}}{T_{об}}} \right), \quad (2)$$

$$W_{об}(s) = e^{-\tau_{об} * s} * \frac{K_{об}}{T_{об} * s + 1}, \quad (3)$$

де  $s$  – символ перетворення Лапласа (оператор диференціювання);

$h(\tau)$  – перехідна функція,  $\frac{од. \text{вихід}}{од. \text{вхід}}$ ;

$K_{об}$  – коефіцієнт передачі ОУ,  $\frac{од. \text{вихід}}{од. \text{вхід}}$ ;

$\tau$  – час, сек;

$\tau_{об}$  – час транспортного запізнення, сек;

$T_{об}$  – стала часу (час диференціювання), сек;

$W_{об}$  – передавальна функція ОУ (оператор ОУ).

На рисунках 5–8 наведені структура астатичного ОУ, стрибкоподібне збурення зі сторони ОУ, крива розгону астатичного ОУ і апроксимована перехідна характеристика астатичного ОУ.

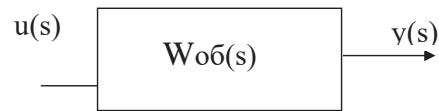


Рис. 5. Структура астатичного ОУ

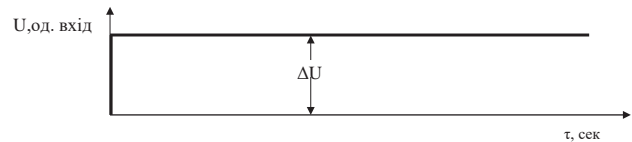


Рис. 6. Стрибокподібне збурення для астатичного ОУ

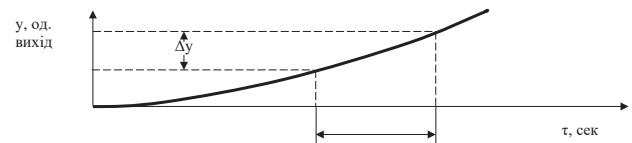


Рис. 7. Крива розгону астатичного ОУ

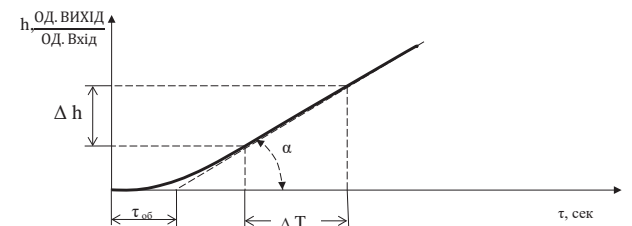


Рис. 8. Апроксимована перехідна характеристика астатичного ОУ

Зміна відгуку астатичного ОУ розраховується за формулою (4). Швидкість зміни відгуку астатичного ОУ розраховується за формулою (5).

$$\Delta h = \frac{\Delta y}{\Delta u}, \quad (4)$$

$$E_{об} = \frac{\Delta h}{\Delta \tau} = \frac{\Delta y}{\Delta u * \Delta \tau}, \quad (5)$$

де  $\Delta h$  – зміна відгуку,  $\frac{од. \text{вихід}}{од. \text{вхід}}$ ;

$\Delta y$  – зміна вихідного сигналу, од. вихід;

$\Delta u$  – зміна вхідного сигналу, од. вхід ;

$E_{об}$  – швидкість зміни відгуку,  $\frac{\text{од. вихід}}{\text{од. вхід} \cdot \text{сек}}$  ;

$\Delta \tau$  – зміна часу, сек.

Якщо  $0 \leq \tau \leq \tau_{об}$ , то  $h(\tau) = 0$ , якщо  $\tau > \tau_{об}$ , то апроксимована перехідна характеристика астатичного ОУ розраховується за формулою (6). В свою чергу, апроксимована передавальна функція астатичного ОУ розраховується за формулою (7).

$$h(\tau) = E_{об} * (\tau - \tau_{об}), \quad (6)$$

$$W_{об}(s) = e^{-\tau_{об} * s} * E_{об} * \frac{1}{s}, \quad (7)$$

де  $h(\tau)$  – перехідна функція,  $\frac{\text{од. вихід}}{\text{од. вхід}}$  ;

$E_{об}$  – швидкість зміни відгуку,  $\frac{\text{од. вихід}}{\text{од. вхід} \cdot \text{сек}}$  ;

$\tau$  – час, сек;

$\tau_{об}$  – час транспортного запізнення, сек;

$W_{об}$  – передавальна функція об'єкту (оператор об'єкту);

$s$  – символ перетворення Лапласа (оператор диференціювання).

Передавальна функція ПІ-регулятора розраховується за формулою (8).

$$W_{об}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) = K_p \frac{T_i s + 1}{T_i s}, \quad (8)$$

де  $W_{об}$  – передавальна функція об'єкту (оператор об'єкту);

$s$  – символ перетворення Лапласа (оператор диференціювання);

$K_p$  – коефіцієнт передачі регулятора,  $\frac{\text{од. вхід}}{\text{од. вихід}}$  ;

$T_i$  – стала часу інтегрування, сек.

Збурення зміною розбалансу на вході ПІ-регулятора, крива розгону і перехідна характеристика ПІ-регулятора наведені на рисунках 9–10.

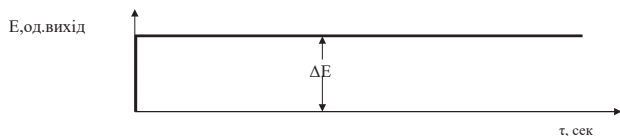


Рис. 9. Стрибокподібне збурення зміною розбалансу на вході ПІ-регулятора

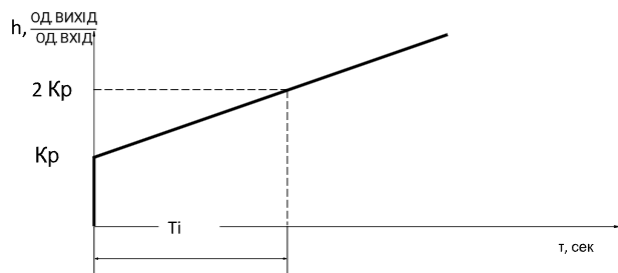


Рис. 10. Перехідна характеристика ПІ-регулятора

Рисунки 1–8 і формули (1–7) демонструють, що практично використовувані промислові статичні ОУ (ОУ з самовирівнюванням) з перехідним (ємнісним) запізненням апроксимуються послідовним з'єднанням аперіодичної ланки 1-го порядку і ланки транспортного запізнення (замість перехідного запізнення), а астатичні ОУ (ОУ без самовирівнювання) з перехідним (ємнісним) запізненням апроксимуються послідовним з'єднанням інтегральної ланки і ланки транспортного запізнення (замість перехідного запізнення).

Оптимальним регулятором для статичного ОУ, апроксимованого послідовним з'єднанням аперіодичної ланки 1-го порядку і ланки транспортного запізнення, буде ПІ-регулятор. Оптимальним регулятором для статичного ОУ, апроксимованого послідовним з'єднанням аперіодичної ланки 2-го порядку (двома послідовно з'єднаними аперіодичними ланками 1-го порядку) і ланки транспортного запізнення, буде ПІД-регулятор. Оптимальним регулятором для статичного ОУ з великим перехідним запізненням (тобто з великим апроксимованим транспортним запізненням) є І-регулятор.

Оптимальним регулятором для астатичного ОУ, апроксимованого послідовним з'єднанням інтегральної ланки і ланки транспортного запізнення, буде ПІ-регулятор. Використання ПІ-регулятора для статичного ОУ неефективне, так як замкнена САР не забезпечує нульову статичну похибку регулювання (в кінці перехідного процесу регульований параметр ніколи не виходить на задане значення). Використання ПІ-регулятора (або ПІД) для астатичного ОУ можливе, але забезпечує гірший перехідний процес і може призводити до значних перерегулювання і часу регулювання в перехідному процесі в замкненій САР. Використання І-регулятора для астатичного ОУ неможливе, так як замкнена САР в цьому випадку є структурно несталою, тобто такою, в якій не може бути реалізований перехідний процес, що сходиться до заданого значення регульованого параметру; такий процес не може бути реалізований при будь-яких параметрах астатичного ОУ і при будь-яких налагодженнях І-регулятора (причина цього полягає в тому, що в розімкненій САР послідовно з'єднані дві інтегральні ланки – сам астатичний ОУ і сам І-регулятор).

Формула (8) і рисунки 9-10 демонструють, що практично використовуваний ПІ-регулятор (частіше використовують замість ПІД-регулятора просто ПІ-регулятор без Д-частини, так як Д-частина «підкреслює» високочастотні перешкоди, погір-

шуючи перехідний процес в замкненій САР) є паралельним з'єднанням П-, І- і Д-частин, але зі спільним коефіцієнтом передачі регулятора. Така структура ПІ-регулятора унеможливорює редукцію ПІ-закону до П-закону (який є оптимальним законом регулювання для астатичних ОУ) або до І-закону (який є оптимальним для статичних ОУ з великим перехідним запізненням, тобто з великим апроксимованим транспортним запізненням).

Так звані «теплоенергетичні» ОУ – це «повільні» ОУ, тобто це ОУ з великими перехідними запізненнями (наслідок процесів теплообміну в «теплоенергетичних» ТОУ); в той же час такі ОУ практично не мають транспортного запізнення.

ПІД-закон регулювання реалізується не тільки ФБ ПІД-регулятора в ПЛК, а комплектом «ФБ в ПЛК – ВМ». Використовуються два типи ВМ – аналоговий (керується одним аналоговим сигналом 0-10 В з ПЛК; цей сигнал з ПЛК є заданим значенням положення РО; аналоговий ВМ є повторювачем, тобто пропорційною одиничною ланкою) і трипозиційний (керується двома дискретними командами БІЛЬШЕ і МЕНШЕ 0–24 В; ці команди переміщують ВМ і РО відповідно в напрямку ВІДКРИТИ і ЗАКРИТИ; трипозиційний ВМ є інтегратором, тобто інтегруючою ланкою). Для аналогового ВМ – ФБ в ПЛК має реалізовувати дійсно ПІД-закон регулювання (тоді комплект ФБ-ВМ реалізує саме ПІД-закон регулювання). Для трипозиційного ВМ – ФБ в ПЛК має реалізовувати ДПІД<sup>2</sup>-закон регулювання, який трипозиційний ВМ як інтегратор «інтегрує» в ПІД-закон регулювання (тоді комплект ФБ-ВМ реалізує саме ПІД-закон регулювання).

Всі моделі ОУ і ПІДрегуляторів, які розглядаються далі в статті, розроблені в середовищі СКМ Matlab Simulink.

Будь-який теплоенергетичний ТОУ можна представити як структуру з таких технологічних елементів: 1) вентиль; 2) труба; 3) відкритий бак; 4) закритий бак (ресивер).

На рис. 11 наведені елементарні ланки вказаних технологічних елементів (моделі елементарних промислових ОУ).

Елементарні теплоенергетичні ОУ представлені як: 1) вентиль – пропорційна ланка; 2) труба – ланка транспортного запізнення; 3) відкритий бак – інтегруюча ланка; 4) закритий бак (ресивер) – інтегратор (відкритий бак) з одиничним зворотним зв'язком (закрита кришка, яка «створює» зворотний зв'язок), тобто аперіодична ланка 1-го порядку.

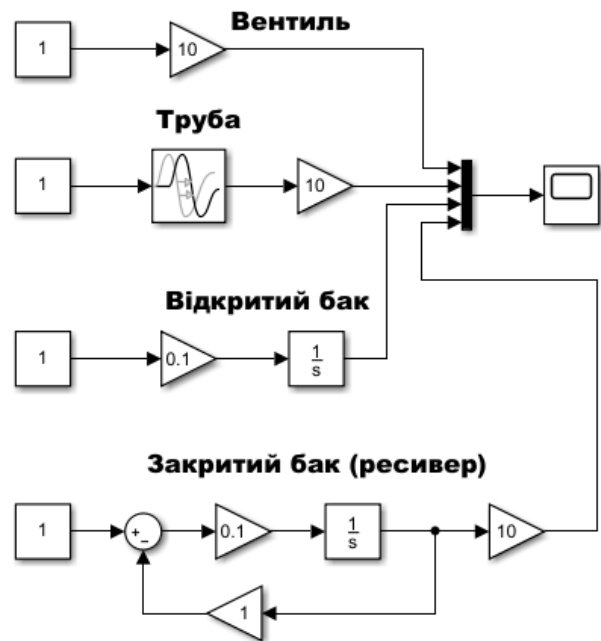


Рис. 11. Моделі елементарних промислових ОУ в СКМ Matlab Simulink

На рис. 12 наведена модель універсального ОУ в СКМ. Каскадна САР для моделювання є найкращою САР (бо є САР з додатковим інформаційним каналом, так як реалізує принцип регулювання з проміжною точкою ОУ) і універсальною САР (так як може бути переконфігурована в одноконтурну САР). Реальна модель універсального теплоенергетичного ОУ в імітаційному моделюванні каскадної САР реалізована у вигляді послідовного з'єднання: для моделі ОУ в СКМ – 4-х аперіодичних ланок 1-го порядку (дві перші ланки – швидкісний ОУ; дві останні ланки – інерційний ОУ); для моделі ОУ в ПЛК – 2-х аперіодичних ланок 1-го порядку (перша ланка – швидкісний ОУ; друга ланка – інерційний ОУ). Змодельовані збурення зі сторони РО і перешкоди, накладені на датчик основного регульованого параметру.

Рекомендації з використання регуляторів в замкненій САР:

– ОУ з самовирівнюванням (статичний ОУ – вихід ОУ плавно переходить на нове стає значення при збуренні зі сторони входу ОУ). Приклад ОУ: канал передачі дії «зміна витрати води через батарею – зміна температури повітря в кімнаті».

- 1) Принципово не використовувати П-регулятор, так як він не забезпечує нульову статичну похибку в кінці перехідного процесу.
- 2) Принципово потрібно використовувати І-регулятор, так як він забезпечує нульову статичну похибку в кінці перехідного процесу.
- 3) Рекомендується використовувати ПІ-регулятор як найкращий регуля-

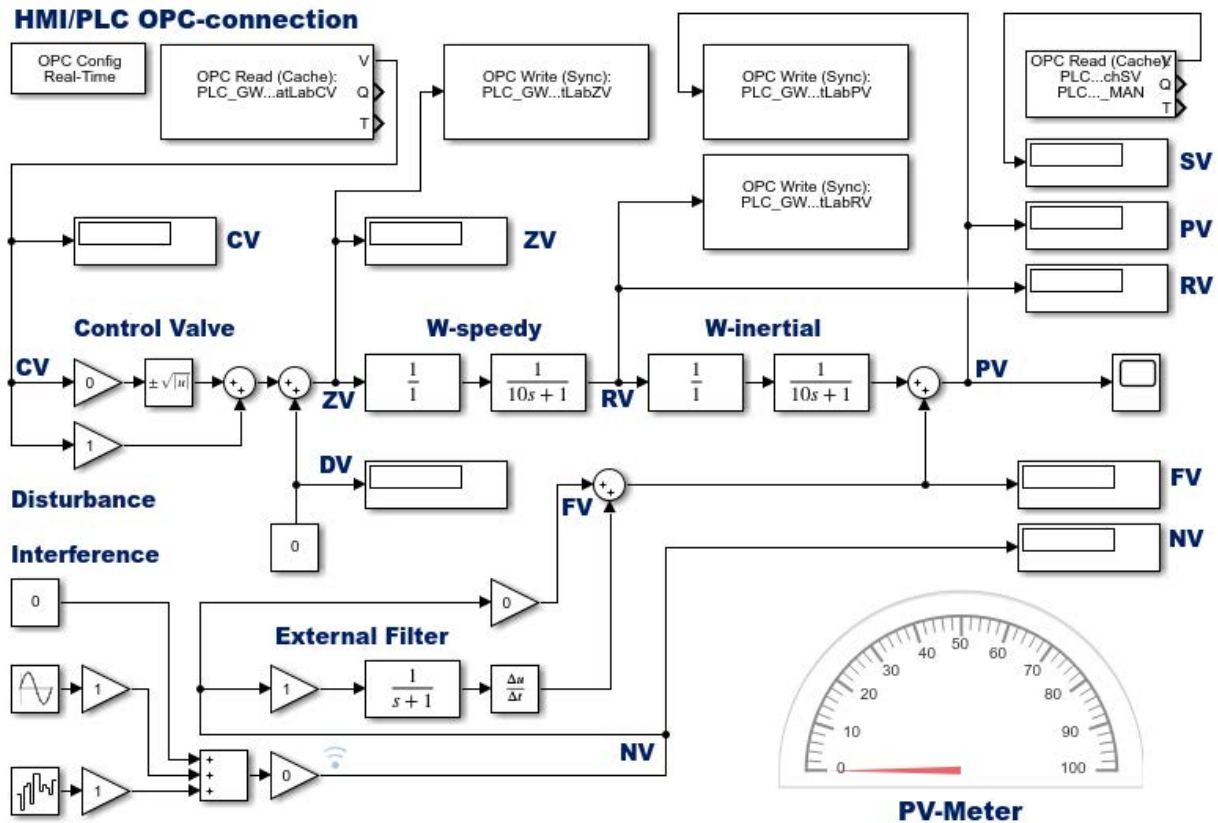


Рис. 12. Модель універсального ОУ в СКМ Matlab Simulink

тор для статичного ОУ, так як повільна І-частина забезпечує нульову статичну похибку, а швидка П-частина забезпечує швидше якісне регулювання (відносно нетривалий малоколивальний перехідний процес).

– ОУ без самовирівнювання (астатичний ОУ – вихід ОУ неперервно змінюється при збуренні зі сторони входу ОУ і не переходить на нове стає значення). Приклад ОУ: канал передачі дії «матеріальний небаланс – зміна рівня води в баці».

1) Принципово не використовувати І-регулятор, так як САР з двома послідовно включеними інтеграторами є структурно несталою (САР є або на межі сталості – синусоїдальні коливання однакової амплітуди; або САР є несталою – перехідний процес, що розходиться – амплітуда кожного напівперіоду коливань більша за попередню), тобто в ній ніякими налагодженнями регулятора не можна забезпечити сталість САР (перехідний процес, що сходиться – амплітуда кожного напівперіоду коливань менша за попередню). 2) Можна використовувати П-регулятор, так як він забезпечує нульову статичну похибку в кінці перехідного процесу для збурення завданням і малу ненульову для збурення зі сторони РО. П-регулятор рекомендується як безпечний регулятор для астатичного ОУ. 3) Можна

використовувати ПІ-регулятор. Він завжди забезпечує нульову статичну похибку, але І-частина призводить до повільнішого регулювання (відносно тривалий коливальний перехідний процес).

На рис. 13 представлені моделі в СКМ двох структур ПІД-регулятору – з загальним коефіцієнтом передачі та з незалежними коефіцієнтами для П-, І- та Д-частини. Перевагою структури з загальним коефіцієнтом передачі є те, що в стандартних розрахунках розраховується загальний коефіцієнт передачі ( $K_p$ ), стала часу інтегрування ( $T_i$ ) та стала часу диференціювання ( $T_d$ ). Недоліком структури з загальним коефіцієнтом передачі є те, що не можна отримати П- та І-регулятор шляхом обнулення коефіцієнтів. Перевагою структури з незалежними коефіцієнтами є той факт, що шляхом обнулення коефіцієнтів можна отримати будь-який регулятор, в тому числі П- та І-регулятори (тому саме в цьому сенсі така структура ПІД-регулятору є універсальною). Недоліком структури з незалежними коефіцієнтами є те, що розраховані параметри  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  треба перерахувати в коефіцієнти для П-, І- та Д-частин (але це робиться дуже легко). Структура ПІД-регулятору з незалежними коефіцієнтами П-, І- і Д-частин стає всі більш популярною і живаною в ПЛК.



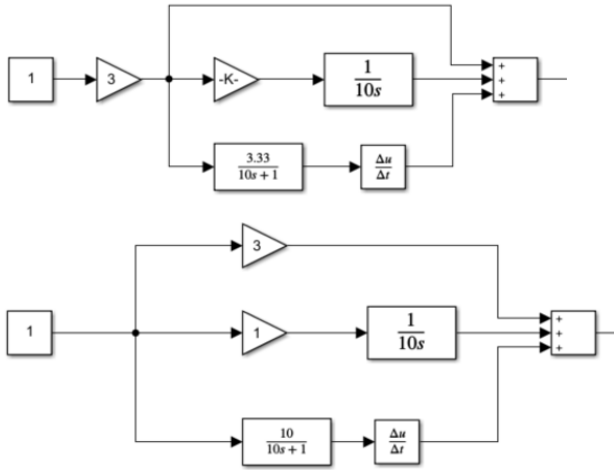


Рис. 13. Модель аналогового регулятора в СКМ Matlab Simulink. А – із загальним коефіцієнтом передачі. Б – з незалежними коефіцієнтами для П-, І- та Д-частин

Наведені на рис. 13 структури ПІД-регуляторів реалізуються у вигляді ФБ в ПЛК і використовуються з ВМ змінної швидкості (аналоговими ВМ). Аналоговий ВМ є позиціонером, тобто пропорційною ланкою з одиничним коефіцієнтом передачі.

На рис. 14 представлена модель релейно-імпульсного ПІД-регулятора (для спрощення моделі використаний ПІ-регулятор замість ПІД-регулятора), який фактично є ДПІД<sup>2</sup>-регулятором і в комплекті з ВМ постійної швидкості (трипозиційним ВМ) формує ПІД-закон регулювання (трипозиційний ВМ є інтегратором та «інтегрує» ДПІД<sup>2</sup>-закон в ПІД-закон).

Трипозиційний ВМ змодельований двома інтеграторами (один в сторону БІЛЬШЕ і другий в сторону МЕНШЕ). ФБ ДПІД<sup>2</sup>-регулятора фактично змодельований як послідовне з'єднання ПІД-регулятора і диференціальної ланки. Диференціальна ланка змодельована як два двопозиційних реле (в сторони БІЛЬШЕ і МЕНШЕ), охоплені зворотним зв'язком через інтегратори, які імітують трипозиційні ВМ. Фізично вказана диференціальна ланка є часо-імпульсним моду-

лятором (ЧІМ). Використання ЧІМ в комплекті з універсальною структурою ПІД-регулятора дозволяє отримати універсальну структуру ДПІД<sup>2</sup>-регулятора.

Переважна більшість теплоенергетичних ОУ є статичними ОУ (єдиний астатичний ОУ – «зміна матеріального балансу – рівень води в баку»). Практично ефективною апроксимацією статичного ОУ є апроксимація ОУ послідовним з'єднанням аперіодичної ланки 1-го порядку і ланки транспортного запізнення.

Проблема швидкого і в той же час точного розрахунку налагоджень ПІД-регулятора є актуальною задачею автоматичного регулювання. Для одноконтурних і каскадних САР найлегшим і дуже ефективним способом розрахунку налагоджень ПІД-регулятора є так званий експрес-метод (інженерний метод розрахунку), який і був використаний в імітаційному моделюванні теплоенергетичних ОУ.

Експрес-розрахунок ПІ-регулятора для статичного ОУ наведений в формулі (9).

$$K_p = k_1 * \frac{1}{K_{об}} * \frac{T_{об}}{\tau_{об}}, \quad T_i = k_2 * T_{об}, \quad (9)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт передачі ПІД-регулятора,  $\frac{од. вихід}{од. вхід}$  ;

$T_i$  – стала часу інтегрування ПІД-регулятора, сек.

$K_{об}$  – коефіцієнт передачі ОУ,  $\frac{од. вихід}{од. вхід}$  ;

$\tau_{об}$  – стала часу транспортного запізнення ОУ, сек;

$T_{об}$  – стала часу аперіодичної ланки ОУ, сек;

$k_1, k_2$  – безрозмірні нормуючі коефіцієнти, які формують заданий тип перехідного процесу в замкненій САР (аперіодичний; з 20%-им перерегулюванням; з мінімумом квадратичного інтегрального критерію).

Адекватність апроксимованої моделі теплоенергетичного ОУ має розумітись і реалізовуватись в сенсі забезпечення малочутливості замкненої САР (а не в сенсі повної відповідності моделі ОУ і реального ОУ) з ПІД-регулятором, розрахованим на основі апроксимованої моделі ОУ, до

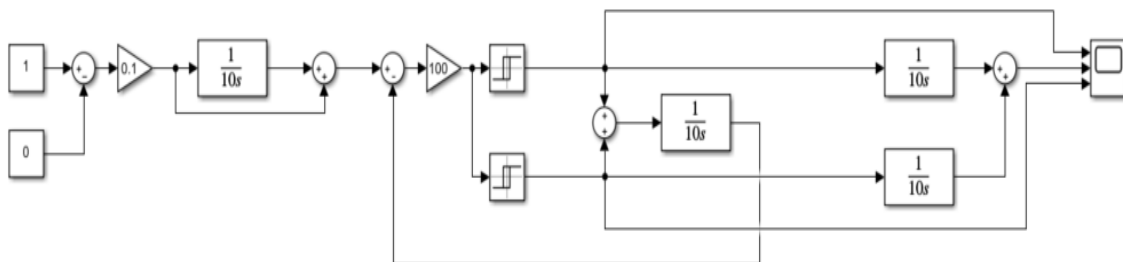


Рис. 14. Модель релейно-імпульсного регулятора з трипозиційним ВМ в СКМ Matlab Simulink

параметричних збурень ОУ. Коефіцієнт передачі ОУ вибирається одиничним (що відповідає представленню входу і виходу ОУ у нормованих відносних одиницях вимірювання, тобто фактично в одиницях сигналів вимірювання і одиницях регулюючої дії). Стала часу аперіодичної ланки 1-го порядку вибирається рівною сталій часу ланки транспортного запізнення (саме таке одиничне співвідношення забезпечує малочутливість САР до параметричних збурень). Відповідно розраховуються налагодження ПД-регулятора Кр і Ті. Для формування аперіодичного перехідного процесу в замкненій САР (який забезпечує найбільший запас сталості замкненої САР) нормуючі коефіцієнти  $k_1$  і  $k_2$  вибираються одиничними.

Особливість реалізованого підходу до розрахунку і моделювання САР полягає в тому, що апроксимована модель ОУ використовується виключно для розрахунку налагоджень ПД-регулятора, а для моделювання перехідного процесу в замкненій САР використовується завжди «реальна» модель ОУ.

Апроксимована і параметризована запропонованим чином модель ОУ (послідовне з'єднання аперіодичної ланки першого порядку з одиничним коефіцієнтом передачі і ланки транспортного запізнення, стала часу якої дорівнює сталій часу аперіодичної ланки) є інваріантною (з достатньою для практичних застосувань точністю) до параметрів ОУ, так як: 1) вхід і вихід ОУ представлений у нормованих відносних одиницях вимірювання, в результаті коефіцієнт передачі апроксимованої моделі ОУ завжди одиничний (незалежно від коефіцієнту передачі ОУ в абсолютних одиницях вимірювання); 2) одиничне співвідношення сталої часу аперіодичної ланки 1-го порядку до сталої часу ланки транспортного запізнення (незалежно від сталої часу ОУ) забезпечує малочутливість САР до параметричних збурень.

Сформульовані рекомендації з вибору моделі і параметрів теплоенергетичного ОУ і налагоджень ПД-регулятора для одноконтурної і каскадної САР були перевірені і підтверджені шляхом аналізу перехідних процесів в замкнених САР, змодельованих в СКМ Matlab Simulink.

#### Висновки.

1. Реальна модель універсального теплоенергетичного ОУ в імітаційному моделюванні каскадної САР реалізована у вигляді послідовного з'єднання: для моделі ОУ в СКМ – 4-х аперіодичних ланок 1-го порядку (дві перші ланки – швидкісний ОУ; дві останні ланки – інерційний ОУ); для моделі ОУ в ПЛК – 2-х аперіодичних ланок

1-го порядку (перша ланка – швидкісний ОУ; друга ланка – інерційний ОУ).

2. Адекватність апроксимованої моделі теплоенергетичного ОУ не обов'язково має розумітись і реалізовуватись в сенсі повної відповідності моделі ОУ і реального ОУ.

3. Адекватність апроксимованої моделі теплоенергетичного ОУ має розумітись і реалізовуватись в сенсі забезпечення малочутливості замкненої САР з ПД-регулятором, розрахованим на основі апроксимованої моделі ОУ, до параметричних збурень (добовий, сезонний і віковий дрейфи параметрів ОУ).

4. Апроксимована модель теплоенергетичного ОУ реалізується у вигляді послідовного з'єднання аперіодичної ланки 1-го порядку і ланки транспортного запізнення (достатньо однієї аперіодичної ланки 1-го порядку, не потрібно використовувати дві аперіодичні ланки 1-го порядку). Коефіцієнт передачі ОУ вибирається одиничним (що відповідає представленню входу і виходу ОУ у нормованих відносних одиницях, тобто фактично в одиницях сигналів вимірювання і одиницях регулюючої дії). Стала часу ланки транспортного запізнення вибирається рівною сталій часу аперіодичної ланки 1-го порядку (саме таке одиничне співвідношення забезпечує малочутливість САР до параметричних збурень).

5. Налagodження ПД-регулятора розраховуються за експрес-формулою. Коефіцієнт передачі ПД-регулятора в одноконтурній САР і стабілізуючого ПД-регулятора в каскадній САР вибираються одиничними. Коефіцієнт передачі коригуючого ПД-регулятора в каскадній САР вибирається на порядок меншим за коефіцієнт передачі стабілізуючого ПД-регулятора (тобто рівним 0.1). Сталі часу інтегрування ПД-регулятора в одноконтурній САР і коригуючого і стабілізуючого ПД-регуляторів вибираються рівними сталій часу аперіодичної ланки 1-го порядку в апроксимованій моделі ОУ (тобто рівними сталій часу ланки транспортного запізнення в апроксимованій моделі ОУ). Вказані налагодження ПД-регуляторів забезпечують аперіодичний перехідний процес в замкненій САР (з найбільшим динамічним викидом, найменшим перерегулюванням і найменшим часом регулювання), що забезпечує практично максимально можливий запас сталості замкненої САР.

6. Апроксимована модель теплоенергетичного ОУ використовується виключно для розрахунку налагоджень ПД-регулятора (для промислових застосувань практично достатньо використовувати експрес-формули). Перехідний процес в замкненій

САР має моделюватись для «реального» ОУ (який якраз і апроксимується моделлю ОУ). Малочутливість САР до параметричних збурень перевіряється також обов'язково моделюванням перехідного процесу в замкненій САР для «реальної» моделі ОУ.

7. Апроксимована і параметризована запропонованим чином модель ОУ (послідовне з'єднання аперіодичної ланки першого порядку з одиничним коефіцієнтом передачі і ланки транспортного запізнення, стала часу якої дорівнює сталій часу аперіодичної ланки) є інваріантною (з достатньою для практичних застосувань точністю) до параметрів ОУ, так як: 1) забезпечує відносну незалежність параметрів апроксимованої моделі ОУ від параметрів реального ОУ; 2) забезпечує малочутливість САР до параметричних збурень ОУ.

8. Розроблена структура аналогового ПІД-регулятора з незалежними П-, І- та Д-частинами (незалежними коефіцієнтами П-, І- та Д-частин) дає можливість, за необхідності, редукувати ПІД-регулятор до П-регулятора (який є оптимальним для астатичного ОУ) або до І-регулятора (який є оптимальним для статичного ОУ з великим перехідним запізненням), тому саме в цьому сенсі така структура ПІД-регулятора є універсальною. Розроблена структура ПІД-регулятора є роботоздатною і такою, що легко реалізується в ПЛК.

9. Розроблена структура релейно-імпульсного ПІД-регулятора (ДПД<sup>2</sup>-закону регулювання), який в комплекті з трипозиційним ВМ (який апроксимується інтегратором) реалізує аналоговий ПІД-закон регулювання. ДПД<sup>2</sup>-закон реалізується в ПЛК диференціюванням ПІД-закону; саме диференціювання реалізоване у вигляді ЧІМ (часо-імпульсного модулятора, в якому тривалість імпульсу є постіна, а період імпульсу, тобто фактично тривалість між імпульсами, залежить від сталої часу інтегрування ПІД-закону). Сам ЧІМ реалізований у вигляді двох двопозиційних реле з гістерезисом відповідно для команд БІЛЬШЕ і МЕНШЕ, охоплених зворотними зв'язками через інтегратори, які імітують трипозиційний ВМ (стала часу інтегрування дорівнює сталій часу ВМ). Використання ЧІМ в комплекті з універсальною структурою ПІД-регулятора дозволяє отримати універсальну структуру ДПД<sup>2</sup>-регулятора. Розроблена структура ДПД<sup>2</sup>-регулятора є роботоздатною і такою, що легко реалізується в ПЛК.

10. Запропоновані інваріантна модель ОУ і універсальні структури ПІД/ДПД<sup>2</sup>-регуляторів можуть бути легко реалізовані відповідно в СКМ і в ПЛК в процесі імітаційного функціонального і структурного моделювання теплоенергетичних САР.

#### Список літератури:

1. Batiuk S.G. Simulation modeling and digital twinning of energy cyber-physical systems (cyber-energy systems). *Achievements of Ukraine and EU countries in technological innovations and invention* : collective monograph. Riga : Baltija Publishing, 2022. P. 44-109. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8>. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-2>.
2. Vilanova, R., Alcántara, S., y Pedret, C. Sintonía de controladores PID: un enfoque analítico basado en el moldeo de la función de sensibilidad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*. 2021. 18(4). P. 313–326. DOI: <https://doi.org/10.4995/riai.2021.15422>.
3. Novikov, P., Shtifzon, O., Bunke, O., & Batiuk, S. Selecting a method for the parametric adaptation of pi-controller in the control systems of boiler assemblies at thermal power stations with supercritical parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 2, 2(116). P. 61-68. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254116>.

#### **Batiuk S.G., Vasianovych V.M., Vroniuk M.V., Voroshylov A.I. INVARIANT MODELS OF CONTROL OBJECTS AND UNIVERSAL STRUCTURES OF PID-CONTROLLERS IN THE IMITATION MODELING OF THERMAL ENERGY SYSTEMS OF AUTOMATIC REGULATION**

*The article is devoted to imitation modeling of modern thermal energy systems of automatic regulation. Modern thermal energy units and systems are complex technical objects that require a high level of automation to ensure stable and efficient operation. The operational efficiency of thermal energy systems of automatic regulation directly affects the economy, efficiency, productivity and reliability of thermal energy technological control objects. Imitation modeling is an important tool for analysis, design and optimization of the operational efficiency of thermal energy systems of automatic regulation.*

*The article states that two tasks of structural imitation modeling are important (even fundamental): 1) modeling control objects (or a technological control object as a set of control objects) in a computer mathematics system or in a PLC; 2) implementation of universal structures of PID-controllers in the PLC. The*

article presents the results of research carried out at the Department of Automation of Energy Processes on these specified problems.

A model of an universal control object was developed and studied for simulating functional and structural modeling of a thermal energy technological control object. The purpose of the research is to develop a universal model of the control object, which is invariant (insensitive) to parametric disturbances of a system of automatic regulation, for modeling a thermal energy technological control object in a typical system of computer mathematics and in a typical PLC.

Universal structures of PID-controllers for simulated functional and structural modeling of thermal energy technological control object were developed and investigated. The purpose of the research: 1) the development of a universal structure of an analog PID-controller with independent P-, I-, and D-parts (PID-controller can be reduced to PD- and ID-controller), which, complete with an analog executive mechanism, implements the PID-regulation law; 2) development of an universal structure of a relay-pulse PID-controller (DPD<sup>2</sup> controller with time-pulse modulation), which, complete with a three-position executive mechanism, implements the PID-regulation law.

**Key words:** thermal energy, technological control object, cyber-physical system, automated control system, system of automatic regulation, information-measuring system, system of program-logic control, automation of technological processes, software-technical means of automation, controller functionality, supervisory functionality, PID-controller, digital twin, edge device, Internet of things, imitation modeling, functional modeling, structural modeling.