

**Батюк С.Г.**

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

**Мар'янський М.О.**

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

**Салівон Д.В.**

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

**Федоров Д.Д.**

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

## ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З СТРУКТУРНИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ І ЦИФРОВИМИ ДВІЙНИКАМИ

*Підвищення ефективності систем автоматичного регулювання (САР) є актуальною задачею промислової автоматизації і реалізується у двох паралельних напрямках: 1) покращення структури і алгоритмів САР; 2) імітаційне моделювання і дослідження структур і алгоритмів САР з метою їх оптимальних конфігурування і параметризації. Метод управління з використанням внутрішньої моделі ОУ є надзвичайно ефективним методом покращення функціонування промислових САР. Реалізація в замкненому контурі регулювання одноконтурної САР моделі прямого каналу ОУ призводить до структуризації класичних ПІД-регуляторів (структурні ПІД-регулятори і ПІД-регулятори змінної структури). Реалізація в розімкнених компенсаційних зв'язках комбінованих САР моделей каналів внутрішніх і зовнішніх збурень ОУ призводить до використання компенсаторів як цифрових двійників ОУ.*

*На кафедрі автоматизації енергетичних процесів НТУУ КПІ виконані роботи з імітаційного моделювання покращених структур і алгоритмів САР з метою їх дослідження і верифікації. В статті викладені результати досліджень за такими тематичними напрямками: 1) розробка одноконтурних САР з структурними ПІД-регуляторами; 2) розробка одноконтурних САР з ПІД-регулятором змінної структури; 3) розробка комбінованих САР з цифровими двійниками. Розроблений полігон функціонального імітаційного моделювання теплоенергетичних САР реалізований як альбом моделей в середовищі СКМ Matlab Simulink.*

*На основі дослідження змодельованих САР щодо сигнальних збурень і аналіз чутливості змодельованих САР відносно параметричних збурень сформульовані наступні висновки і рекомендації: 1) одноконтурні САР з структурними ПІД-регуляторами є роботоздатними і ефективними, легко можуть бути реалізовані стандартними функціональними блоками сучасних ПЛК і рекомендуються до промислового застосування; 2) одноконтурні САР з ПІД-регуляторами змінної структури є роботоздатними і ефективними, легко можуть бути реалізовані стандартними функціональними блоками сучасних ПЛК і рекомендуються до промислового застосування; 3) комбіновані САР з цифровими двійниками є практично нероботоздатними, приципово поступаються ефективністю каскадним САР і не рекомендуються до промислового застосування.*

**Ключові слова:** *теплова енергетика, кібер-фізична система, автоматизована система управління, система автоматичного регулювання, автоматизація технологічних процесів, програмно-технічні засоби автоматизації, імітаційне моделювання, ПІД-регулятор, цифровий двійник, граничний девайс, контролерна функціональність, супервізорна функціональність.*

**Постановка проблеми.** Підвищення ефективності систем автоматичного регулювання (САР) є актуальною задачею промислової автоматизації і реалізується у двох паралельних напрямках: 1) покращення структури і алгоритмів САР; 2) імітаційне моделювання і дослідження структур і алгоритмів САР з метою їх оптимальних конфігурування і параметризації.

Підвищення ефективності одноконтурних САР теплоенергетичних ОУ є актуальною задачею промислової автоматизації. Особливо актуальним є аналіз можливостей практичного застосування модифікованих ПІД-регуляторів в одноконтурних САР теплоенергетичних ОУ.

Практична реалізація комбінованих САР теплоенергетичних ОУ є актуальною задачею промислової автоматизації. Особливо актуальним є аналіз можливостей практичного застосування цифрових двійників (ЦД) теплоенергетичних ОУ в комбінованих САР.

На кафедрі автоматизації енергетичних процесів (АЕП) НТУУ КПІ виконуються роботи з імітаційного моделювання покращених структур і алгоритмів САР з метою їх дослідження і верифікації. В статті викладені результати досліджень за такими тематичними напрямками: 1) розробка одноконтурних САР з структурними ПІД-регуляторами; 2) розробка одноконтурних САР з ПІД-регулятором змінної структури; 3) розробка комбінованих САР з цифровими двійниками.

Термінологія і аббревіатури в тексті статті. Технологічний об'єкт управління (ТОУ) – технологічний агрегат (піч, котел, інженерна система тощо). 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 теплоенергетичного ОУ. Теплоенергетичні ОУ в складі теплоенергетичного ТОУ – це «повільні» і «дуже повільні» ОУ (аперіодичні ланки високого порядку; бак з рідиною – інтегральна ланка).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** ПІД-регулятор є найпоширенішим варіантом в автоматичному неперервному регулюванні і практично домінує в реалізаціях систем стабілізації режимних параметрів промислових ТОУ. Як зазначено і продемонстровано в [1], надзвичайно ефективним методом покращення функціонування промислових САР є метод управління

з використанням внутрішньої моделі ОУ. Реалізація в замкненому контурі регулювання одноконтурної САР моделі прямого каналу ОУ призводить до структуризації класичних ПІД-регуляторів (структурні ПІД-регулятори і ПІД-регулятори змінної структури). Реалізація в розімкнених компенсаційних зв'язках комбінованих САР моделей каналів внутрішніх і зовнішніх збурень ОУ призводить до використання компенсаторів як цифрових двійників ОУ.

Одноконтурні САР з структурними ПІД-регуляторами

Одноконтурна САР режимного параметру реалізує принцип регулювання за відхиленням (принцип зворотного зв'язку) і має один замкнений контур регулювання. Регулятор є одноімпульсним (тобто в САР є тільки один регульований параметр) – на вхід регулятора зі знаком мінус (як зворотний зв'язок) подається поточне значення (імпульс) режимного параметру (завдання подається зі знаком плюс і за імпульс не рахується). ОУ є каналом передачі регульовальної дії «зміна регульовальної дії – зміна регульованого параметру». Регульований параметр завжди вимірюється (а не обчислюється). САР реалізує управляючу функцію стабілізації виміряного регульованого параметру, тобто підтримання виміряного регульованого параметру на заданому значенні (уставці) шляхом зміни регульовальної дії. Використовується класичний ПІД-регулятор, який є оптимальним регулятором для лінійних ОУ. Основний і найпоширеніший тип САР. Фундаментальна, базова і в той же час математично і технічно найпростіша САР. Принципова і видатна особливість одноконтурної САР (тобто принципу регулювання за відхиленням) – зворотний зв'язок від ОУ (вимірний режимний параметр акумулює в собі усі впливи усіх збурень, відомих і невідомих, які можна і які не можна виміряти; регулювання здійснюється завжди і тільки тоді, коли збурення впливають на регульований параметр). Неідеальність одноконтурної САР – принциповий конфлікт між точністю і якістю регулювання в САР (швидкодією регулятора і запасом сталості замкненої САР). Є два шляхи покращення якості регулювання в одноконтурній САР.

Перший шлях. Ускладнювати структуру ПІД-регулятора в одноконтурній САР – перехід до аналітичного конструювання регуляторів (перехід до аналітичних регуляторів ПІД<sup>2</sup>Д<sup>3</sup>... тощо; додаткові параметри Д<sup>2</sup>, Д<sup>3</sup>... тощо обчислюються, а не вимірюються). Основний метод в «сучасній» ТАУ (лінійний аналіз в часовій області – рівняння

в просторі станів). Це неефективно, оскільки призводить до негрубих САР відносно параметричних збурень (дрейфу параметрів ОУ); негрубих саме тому, що додаткові параметри обчислюються, а не вимірюються.

Другий шлях. Ускладнювати структуру САР, не змінюючи ПД-регулятор – перехід до САР з додатковими інформаційними зв'язками (перехід до комбінованих і багатоконтурних – реально двоконтурних – САР). «Додаткові інформаційні» зв'язки: «додаткові» до головного зворотного зв'язку; «інформаційні» тому, що несуть додаткову інформацію, так як додатковий режимний параметр обов'язково вимірюється, а не просто обчислюється. Основний спосіб в «класичній» ТАУ (лінійний аналіз в частотній області – передавальні функції) і в практичній промисловій реалізації. Ефективний, так як призводить до малочутливих САР відносно параметричних збурень (дрейфу параметрів ОУ).

Можливий третій шлях. Залишити одноконтурну структуру САР. Залишити класичний ПД-регулятор, але змінити його структуру шляхом послідовного підключення коригуючих ланок. Структура такого структурного ПД-регулятора не є ускладненою, так як не містить нових похідних (другого і вище порядків).

Одноконтурні САР з ПД-регуляторами змінної структури

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 еквідистантні). Реалізується в лінійних САР (лінійні диференціальні або різницеві рівняння, замість яких використовуються передавальні функції, що дає можливість перейти до алгебраїчних операцій). Промислово роботоздатні тільки лінійні САР. Основним регулятором лінійної САР є класичний ПД-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 нееквідистантні). 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 лінійній одноконтурній САР з ПД-регулятором при неправильних налагодженнях ПД-регулятора може бути перехідний процес, що розходиться. В лінійній САР гармонійні синусоїдальні коливання є ознакою знаходження САР на межі сталості. (це нештатно і погано, тому що така САР є негрубою – вона при параметричних збуреннях може стати як сталою, так і несталою). Якщо лінійна САР є сталою (тобто ще має запас сталості до межі сталості), то перехідний процес сходиться – амплітуди коливань з кожним напівперіодом зменшуються (це штатно і добре). Якщо лінійна САР є несталою, то перехідний процес розходиться – амплітуди коливань з кожним напівперіодом збільшуються (це нештатно і катастрофічно). В авіаційних, воєнних і космічних застосуваннях використовуються виключно нелінійні САР з релейними регуляторами (релейні САР). В промисловості використовуються виключно лінійні САР з ПД-регуляторами. В промисловості релейні САР використовуються тільки тоді, коли АТК має багато САР і дешевше реалізувати релейні САР, ніж лінійні з ПД-регуляторами (економія на сенсорах, актуаторах і кваліфікованих програмістах ПЛК і кваліфікованих налагоджувачах САР).

Окремим різновидом лінійних динамічних систем є системи змінної структури, у яких коефіцієнти при вихідних параметрах лінійного диференціального рівняння залежать від часу (але не залежать від амплітуд регулювальної дії, збурень і регульованого параметру і його похідних).

В нелінійних динамічних системах коефіцієнти при вихідних параметрах лінійного диференціального рівняння залежать від амплітуд регулювальної дії, збурень і регульованого параметру і його похідних (а від часу не залежать; тому таке диференціальне рівняння вже є нелінійним).

Класичним прикладом нелінійного ОУ є ОУ з нелінійним регулюючим органом (РО). РО характеризується витратною характеристикою – залежністю відносної витрати через РО від відносного відкриття РО (відносної площі поперечного перерізу). Інструментальна витратна характеристика РО – це витратна характеристика РО при постійному перепаді тиску на РО; визначається виключно механікою і кінематикою РО; як правило, є лінійною. Робоча витратна характеристика РО – це витратна характеристика РО в реальних умовах експлуатації, тобто при змінному перепаді тиску на РО. Відповідно до рівняння витрати, витрата через РО пропорційна площі поперечного перерізу РО і корню квадратному з перепаду тиску на РО. При постійному перепаді тиску на РО витрата через РО завжди пропорційна площі перерізу, тобто змінюється лінійно (з одним і тим самим коефіцієнтом пропорційності); це і є інструментальна витратна характеристика. В робочих умовах перепад тиску (і, відповідно, корінь квадратний з нього) різний – при повністю відкритому РО він мінімальний, а при повністю закритому РО він максимальний. Відповідно, витрата через РО буде змінюватись нелінійно, тобто з різними коефіцієнтами пропорційності в різних діапазонах положення РО. Робоча витратна характеристика РО є приблизно квадратичною (так як витрата пропорційна корню квадратному з перепаду тиску на РО). Фізично і математично РО входить до складу ОУ, і його коефіцієнт пропорційності входить до складу коефіцієнту пропорційності ОУ. Для інструментальної витратної характеристики РО (тобто для ідеалізованих умов функціонування РО) ми вважаємо, що коефіцієнт пропорційності РО дорівнює одиниці; для робочої витратної характеристики РО (тобто для реальних умов функціонування РО) коефіцієнт пропорційності РО змінний (може бути більше і менше одиниці); а це означає, що, в залежності від положення РО коефіцієнт пропорційності ОУ (в який входить РО) є змінним, тобто такий ОУ стає нелінійним (відповідно, нелінійною стає і вся САР).

ПІД-регулятор лінійної САР з ОУ змінної структури або нелінійним ОУ має мати змінну структуру – параметри регулятора, з метою забезпечення завжди однакової якості регулювання, мають змінюватись в темпі зі зміною параметрів ОУ. Регулятор змінної структури в англомовній технічній літературі називається регулятором з програмним підсиленням (gain-scheduled controller); під коефіцієнтом підсилення розуміється динамічний коефіцієнт підсилення

(тобто вся передатна функція ПІД-регулятора), а не тільки коефіцієнт пропорційності ПІД-регулятора. Термін «змінна структура» для ПІД-регулятора має інший сенс, ніж для ОУ змінної структури. В ОУ змінної структури параметри змінюються тільки в часі. В ПІД-регуляторі змінної структури параметри регулятора можуть змінюватись як в часі (в складі САР з ОУ змінної структури), так і в залежності від положення РО (в складі САР з нелінійним РО, тобто нелінійним ОУ). Таким чином, ПІД-регулятор змінної структури (ПІД-регулятор з програмним підсиленням) може бути використаний як в САР з ОУ змінної структури (і це вже буде САР змінної структури), так і в САР з нелінійним ОУ (і ця САР вже буде, вірніше, залишиться, лінійною САР). Для реалізації САР з ПІД-регулятором змінної структури потрібно кусково-лінійно апроксимувати відповідно динамічну характеристику ОУ змінної структури в часі або нелінійну статичну робочу витратну характеристику РО в залежності від положення РО. На такій кусково-лінійній характеристиці ОУ чи РО виділяються лінійні діапазони, в яких параметри ОУ не змінюються. Відповідно, в межах кожного такого лінійного діапазону ОУ використовуються постійні (в межах діапазону) оптимальні (наперед відомі) параметри ПІД-регулятора.

ПІД-регулятор змінної структури в САР з ОУ змінної структури чи нелінійним ОУ (РО) має фіксувати момент переходу на новий діапазон кусково-лінійної характеристики ОУ і програмно змінювати свої параметри налагодження (які попередньо розраховані, завантажені і зберігаються як дані в пам'яті ПЛК).

#### Комбіновані САР з цифровими двійниками

Комбінована САР режимного параметру реалізує принцип комбінованого регулювання – комбінація принципу зворотного зв'язку і принципу компенсації збурень. Структурно є одноконтурною САР з додатковою компенсацією вимірних сигнальних збурень. Компенсатори в комбінованій САР використовуються в розімкненому контурі регулювання, тому не створюється додатковий замкнений контур регулювання, тому компенсатори не впливають на сталість замкненої САР. Компенсатори комбінованої САР є типовим (і практично єдиним) прикладом застосування ЦД в реальних промислових САР (в розімкненому контурі).

#### **Постановка завдання:**

1. Змодельовати і дослідити одноконтурні САР з структурними ПІД-регуляторами.

2. Змодельовати і дослідити одноконтурну САР з ПДД-регулятором змінної структури.

3. Змодельовати і дослідити комбіновані САР з компенсаторами збурень як цифровими двійниками.

**Виклад основного матеріалу.** Розроблений полігон функціонального імітаційного моделювання теплоенергетичних САР з структурними регуляторами і цифровими двійниками – альбом моделей в середовищі СКМ Matlab Simulink, реалізований як функціональна частина полігону імітаційного SIL-моделювання промислових АТК [2].

Функціональне імітаційне моделювання одноконтурної САР з структурними ПДД-регуляторами

Моделювались і досліджувались наступні САР: одноконтурна САР з предиктивним ПДД-регулятором; одноконтурна САР з каскадним ПДД-регулятором; одноконтурна САР з квадратичним ПДД-регулятором.

Модель одноконтурної САР з предиктивним ПДД-регулятором наведена на рис. 1. Моделі одноконтурних САР з каскадним і квадратичним ПДД-регуляторами наведені на рис. 2.

Задля наочності і порівняння структур на моделях наведені структури одноконтурної САР з класичним ПДД-регулятором. Використовується модель універсального ОУ з випереджальною та інерційною частинами.

Предиктивний ПДД-регулятор реалізує класичну ідею предиктора Сміта (модель САР з предиктором Сміта також, задля наочності, наведена на рис. 1). Предиктивний ПДД-регулятор реалізо-

ваний як регулятор з еталонною моделлю випереджальної частини універсального ОУ. Каскадний ПДД-регулятор реалізований як регулятор з еталонною моделлю стабілізуючої САР каскадної САР універсального ОУ.

Каскадний ПДД-регулятор реалізований як регулятор з еталонною моделлю стабілізуючої САР каскадної САР універсального ОУ.

Основна ідея предиктивного і каскадного ПДД-регуляторів – за рахунок введення еталонних моделей в замкнений контур регулювання зімітувати регулювання з використанням вимірюваного проміжного параметру універсального ОУ. Обов'язковою умовою є вимірювання і використання в структурі регулятора реальної регулюючої дії (реального входу ОУ), а не просто виходу функціонального блоку регулятора в ПЛК. В цьому випадку в класичному регуляторі з'являється внутрішній додатковий реальний контур регулювання, регулятор стає структурним регулятором; але для нового структурного регулятора САР залишається одноконтурною. Як відомо, практично ефективними є два типи промислових САР – одноконтурна САР і каскадна САР. Для використання каскадної САР потрібно мати можливість вимірювати параметр з проміжної точки універсального ОУ. Якщо такої можливості немає, може бути використана одноконтурна САР з предиктивним або (краще) каскадним регулятором.

Квадратичний регулятор є послідовним з'єднанням двох ПД-регуляторів. Відсутні будь-які додаткові зв'язки та імпульси. Передатна функція квадратичного регулятора –  $PI^2$  (звідси і назва

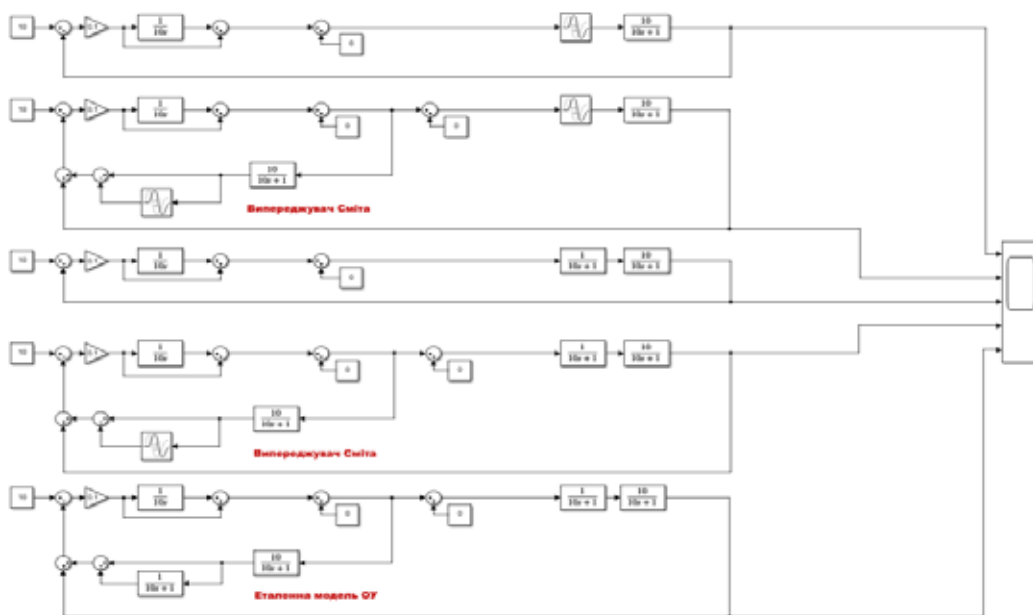


Рис. 1. Модель одноконтурної САР структурним предиктивним регулятором

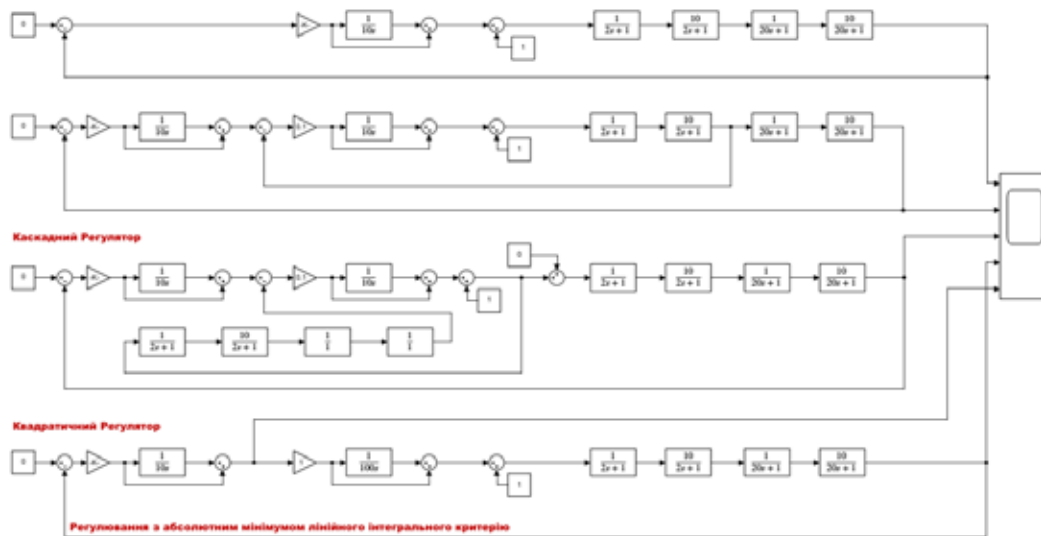


Рис. 2. Моделі одноконтурних САР з структурними каскадним і квадратичним регуляторами

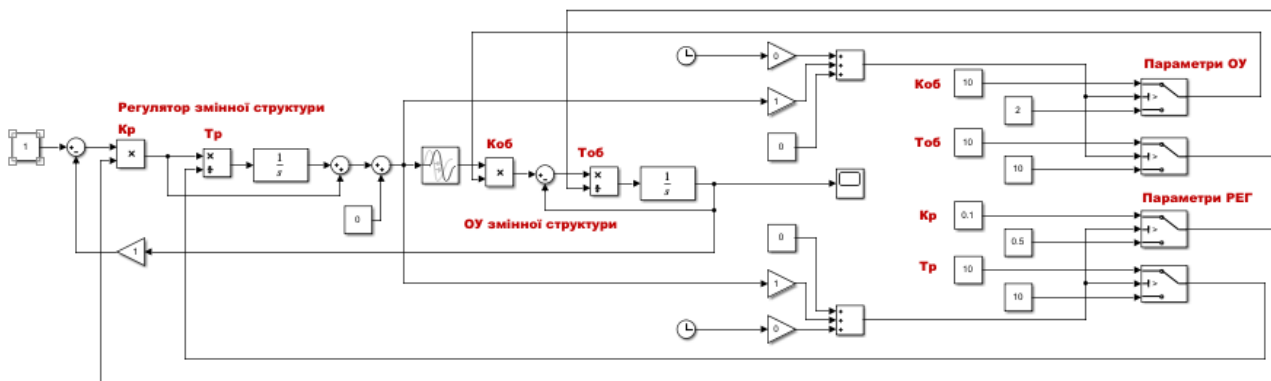


Рис. 3. Модель одноконтурної САР з ПІД-регулятором змінної структури

«квадратичний»). Квадратичний регулятор реалізує абсолютний мінімум лінійного інтегрального критерію – перехідний процес в САР з квадратичним регулятором має нульове значення лінійного інтегралу (площі «плюсових» і «мінусових» напівперіодів взаємно компенсуються).

Дослідження змодельованих одноконтурних САР з структурними ПІД-регуляторами здійснювалось нанесенням сигнальних збурень зі сторони РО (внутрішнє збурення) і зміною завдання. Аналіз чутливості змодельованих одноконтурних САР з структурними ПІД-регуляторами щодо параметричних збурень (дрейфу параметрів ОУ) здійснювалось зміною параметрів структурних регуляторів.

Функціональне імітаційне моделювання одноконтурної САР з ПІД-регулятором змінної структури

Моделювались і досліджувались наступні САР з ПІД-регулятором змінної структури: САР з ОУ змінної структури; САР з нелінійним ОУ (нелінійним РО).

Модель одноконтурної САР з ПІД-регулятором змінної структури наведена на рис. 3.

Динамічна перехідна характеристика САР з ОУ змінної структури кусково-лінійно апроксимована двома лінійними діапазонами постійних значень параметрів ОУ змінної структури. Нелінійна витратна характеристика РО кусково-лінійно апроксимована двома лінійними діапазонами постійних значень параметрів нелінійного ОУ (з причини нелінійного РО, тобто нелінійності робочої витратної характеристики РО).

Дослідження змодельованих одноконтурних САР з ПІД-регуляторами змінної структури здійснювалось нанесенням сигнальних збурень зі сторони РО (внутрішнє збурення) і зміною завдання. Аналіз чутливості змодельованих одноконтурних САР з структурними ПІД-регуляторами щодо параметричних збурень (дрейфу параметрів ОУ) здійснювалось зміною параметрів ПІД-регуляторів змінної структури.

Функціональне імітаційне моделювання комбіновані САР з цифровими двійниками

Моделювались і досліджувались наступні САР: комбінована САР з компенсацією на вхід регулятора; комбінована САР з компенсацією на вихід регулятора; САР зв'язаного регулювання для двомірного ОУ з прямими і перехресними зв'язками; комбінована САР з ЦД як компенсатором зовнішніх (за навантаженням) сигнальних збурень; комбінована САР з ЦД як компенсатором внутрішніх (зі сторони РО) сигнальних збурень.

Комбіновані САР з компенсацією на вхід і вихід регулятора, двомірна САР зв'язаного регулювання моделювались як стандартні структурні схеми відповідних САР.

Модель комбінованої САР з цифровими двійниками наведена на рис. 4.

ЦД в комбінованих САР реалізовані як компенсатори з подачею виходу компенсатору на вихід регулятора (цей спосіб компенсації є кращим за подачу виходу компенсатору на вхід регулятора).

Окремо змодельована комбінована САР з ЦД як компенсатором зовнішніх збурень має в своєму складі прямий ЦД (пряму передатну функцію) каналу ОУ «зовнішнє збурення – регульований параметр» і обернений ЦД (обернену передатну функцію) каналу ОУ «регульовальна дія – регульований параметр».

Окремо змодельована комбінована САР з ЦД як компенсатором внутрішніх збурень має в своєму складі тільки прямий ЦД (пряму передатну функцію) каналу ОУ «внутрішнє збурення – регу-

льований параметр» і не має оберненого ЦД (оберненої передатної функції) каналу ОУ «регульовальна дія – регульований параметр».

Дослідження змодельованих комбінованих САР здійснювалось нанесенням сигнальних збурень навантаженням (зовнішнє збурення), зі сторони РО (внутрішнє збурення), зміною завдання. Основним типом збурення в комбінованій САР, яке потрібно компенсувати, є саме зовнішнє збурення – збурення зміною навантаження (збурення зі сторони РО є основним для каналу регулювання «зміна регульовальної дії – зміна регульованого параметру»). Аналіз чутливості змодельованих комбінованих САР відносно параметричних збурень (дрейфу параметрів ОУ) здійснювалось зміною параметрів компенсаторів.

**Результати і висновки.** Дослідження змодельованих одноконтурних САР з структурними ПІД-регуляторами щодо сигнальних збурень і аналіз чутливості змодельованих одноконтурних САР з структурними ПІД-регуляторами відносно параметричних збурень дає можливість сформулювати наступні результати і висновки (рекомендації):

1. Одноконтурні САР з структурними ПІД-регуляторами є роботоздатними – забезпечують якісні перехідні процеси регулювання і малочутливі щодо параметричних збурень. Структурні ПІД-регулятори легко можуть бути реалізовані стандартними функціональними блоками сучасних ПЛК;

2. САР з предиктивним і каскадним регулятором може бути використана замість каскадної

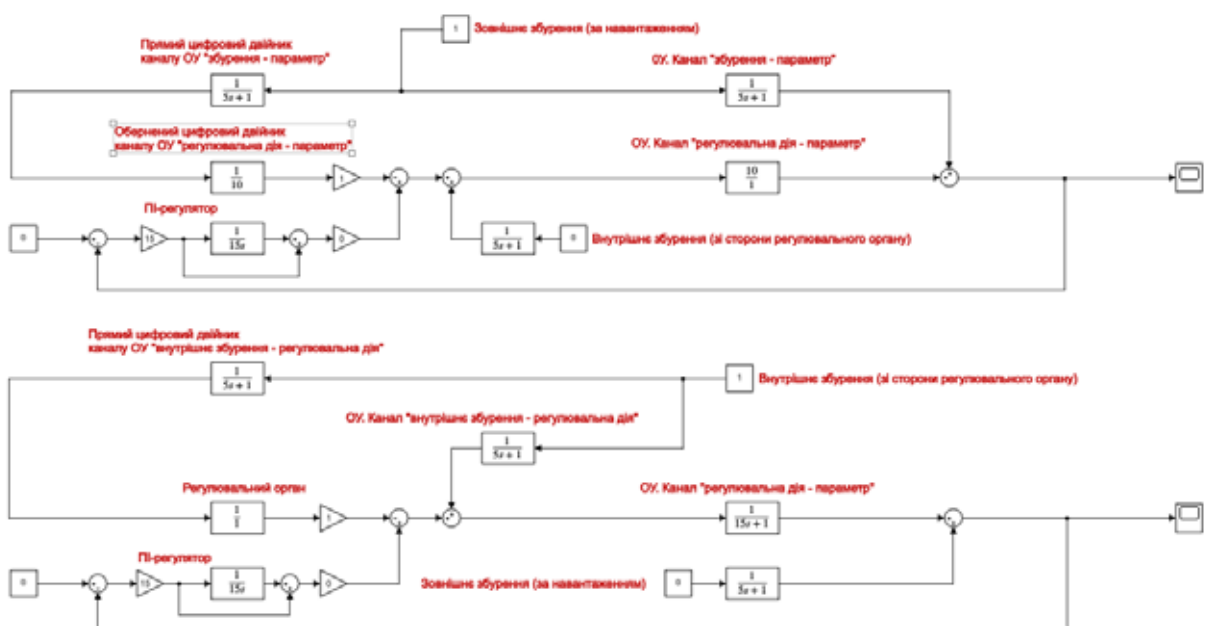


Рис. 4. Модель комбінованої САР з ЦД в СКМ Matlab Simulink

САР для універсальних ОУ, в яких параметр з проміжної точки неможливо виміряти. Обов'язковою умовою є вимірювання і використання в структурі регулятора реальної регулюючої дії (реального входу ОУ), а не просто виходу функціонального блоку регулятора в ПЛК;

3. САР з квадратичним регулятором може бути використана як САР температури в топках, яка забезпечує однакове (постійне) теплове навантаження за час перехідного процесу (перевищення температури компенсуються ідентичними заниженнями температури за час перехідного процесу).

Дослідження змодельованих одноконтурних САР з ПІД-регуляторами змінної структури щодо сигнальних збурень і аналіз чутливості змодельованих САР з ПІД-регуляторами змінної структури відносно параметричних збурень дає можливість сформулювати наступні результати і висновки (рекомендації):

1. Одноконтурні САР з ПІД-регуляторами змінної структури є роботоздатними – забезпечують якісні перехідні процеси регулювання і малочутливі щодо параметричних збурень. ПІД-регулятори змінної структури легко можуть бути реалізовані стандартними функціональними блоками сучасних ПЛК;

2. ПІД-регулятори змінної структури ефективні для нелінійних ОУ, нелінійність яких спричинена суттєвою нелінійністю робочої витратної характеристики РО;

3. ПІД-регулятори змінної структури ефективні для використання в адаптивних САР, в яких на основі моделі або цифрового двійника ОУ розраховуються параметри ОУ, які змінилися внаслідок дрейфу характеристик ОУ (добовий дрейф; сезонний дрейф; віковий дрейф, тобто старіння ОУ).

Дослідження змодельованих комбінованих САР щодо сигнальних збурень і аналіз чутливості змодельованих комбінованих САР відносно параметричних збурень дає можливість сформулювати наступні результати і висновки (рекомендації):

1. Комбінована САР як з компенсацією на вхід регулятора (подача виходу компенсатора на вхід регулятора), так і з компенсацією на вихід регулятора (подача виходу компенсатора на вихід регулятора) легко може бути реалізована в сучасних ПЛК стандартними функціональними блоками. До використання ПЛК реально можливо було реалізувати тільки компенсацію на вхід регулятора (було практично неможливо реалізувати підсумовування фізичних виходів апаратних

регулятору і компенсатору). Сучасні ПЛК дають можливість легко програмно обчислити суму виходів функціональних блоків регулятора і компенсатора, тим самим реалізувати компенсацію на вихід регулятора;

2. Компенсація зовнішнього і внутрішнього збурень на вхід регулятора є неефективною, так як такий компенсатор має мати в своєму складі реальний диференціатор (послідовне з'єднання диференціатору і аперіодичної ланки). Реальний диференціатор легко може бути реалізований в сучасних ПЛК (перемноження практично скільки завгодно малого значення кінцевої різниці на практично скільки завгодно великий коефіцієнт дозволяє реалізувати за скан ПЛК імпульс практично скільки завгодно великої амплітуди; обмеження накладаються тільки типом даних використаних змінних). Проблема полягає в тому, що теплоенергетичні ОУ є «повільними» ОУ. Повільна зміна параметру не є проблемою для обчислення похідної в ПЛК, як вказано вище; проблема в сенсорі – мала зміна параметру знаходиться в межах чутливості вимірювання (приклад: припустімо, що температура зовнішнього середовища, яка є типовим зовнішнім збуренням, змінюється зі швидкістю 1 градус за секунду – і це дуже велика швидкість зміни порівняно з реальною повільною зміною температури зовнішнього середовища; стандартна тривалість фіксованого скану в сучасних ПЛК – не більше 20 мсек; відповідно, якщо кінцеву різницю температури обчислювати навіть за три скани – вона складає всього навсього 0.06 градусу, що є в межах чутливості сенсора; і сенсор не зафіксує цю зміну температури; хоча для самого ПЛК різниця 0.06 цілком достатня для обчислення похідної). Комбінована САР з компенсацією на вхід регулятора не рекомендується для промислового застосування;

3. Компенсація зовнішнього збурення на вихід регулятора є неефективною, так як такий компенсатор є інтегро-диференціальною ланкою, тобто має в своєму складі реальний диференціатор (паралельне з'єднання реального диференціатору і аперіодичної ланки). Причини неефективності застосування реального диференціатору такі ж, як і в п. 2. Комбінована САР з компенсацією зовнішнього збурення на вихід регулятора не рекомендується для промислового застосування;

4. Компенсація внутрішнього збурення на вихід регулятора є ефективною, так як такий компенсатор не містить реального диференціатору, а містить тільки, як правило, аперіодичну ланку, яка легко може бути реалізована в ПЛК. Комбіно-



вана САР з компенсацією внутрішнього збурення на вихід регулятора може бути рекомендована для промислового застосування;

5. Компенсатори в комбінованій САР можуть бути реалізовані як реальні ЦД (тобто як «ідеальні» моделі, керовані вимірюваннями), а не просто у вигляді реального диференціатора або інтегро-диференціальної ланки. Але такі ЦД мають ті ж самі недоліки, що і «прості» компенсатори. Комбінована САР з ЦД як компенсатором зовнішніх збурень не може бути рекомендована для промислового застосування, так як має в своєму складі (крім прямого ЦД каналу ОУ «зовнішнє збурення – регульований параметр») обернений ЦД каналу ОУ «регульовальна дія – регульований параметр» (фактично, обернену передатну функцію ОУ, тобто, фактично, інтегро-диференціальну ланку, як і стандартний компенсатор). Комбінована САР з ЦД як компенсатором внутрішніх збурень може бути рекомендована для промислового застосування, так як має в своєму складі тільки прямий ЦД (пряму передатну функцію) каналу ОУ «внутрішнє збурення – регульований параметр» (тобто, не містить реальної диференціальної або інтегро-диференціальної ланки);

6. Основним збуренням в комбінованій САР, яке треба компенсувати, є зовнішнє збурення, для якого компенсація компенсатором або ЦД, як вказано вище, взагалі неефективна. Внутрішнє

збурення в комбінованій САР не є основним збуренням, яке потрібно компенсувати компенсатором (або ЦД) в комбінованій САР; і ефективною є тільки компенсація внутрішнього збурення компенсатором (або ЦД) на вихід регулятора. В той же час, внутрішнє збурення завжди ефективно компенсується стабілізуючим регулятором в каскадній САР (двоконтурній САР з додатковим інформаційним зв'язком з виміряної проміжної точки ОУ); і така компенсація завжди ефективніша за компенсацію компенсатором (або ЦД) в комбінованій САР. Таким чином, комбінована САР з компенсатором (або ЦД) або взагалі неефективна для зовнішнього збурення, або завжди менш ефективна, ніж каскадна САР, для внутрішнього збурення. Загальний висновок щодо застосування комбінованих САР – комбінована САР не може бути рекомендована для промислового застосування;

7. Система зв'язаного регулювання є реалізацією комбінованої САР, тому має всі недоліки комбінованої САР і, відповідно, не може бути рекомендована для промислового застосування. Перехресні зв'язки в ОУ мають бути ліквідовані технологічним рішенням, а не за рахунок компенсації взаємних збурень. Приклад такого рішення – стабілізація тиску в колекторі, що спричинює ліквідацію перехресних зв'язків в нитках і дозволяє реалізувати замість системи зв'язаного регулювання автономні САР в кожній нитці.

#### Список літератури:

1. Vilanova, R., Alcántara, S., Pedret, C. 2021. PID Tuning: Analytical approach based on the weighted Sensitivity problem. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 18, 313-326. <https://doi.org/10.4995/riai.2021.15422>.
2. Батиук С.Г. Імітаційне моделювання і цифровий твінінг енергетичних кібер-фізичних систем (кібер-енергетичних систем) // Досягнення України та країн ЄС у сфері інновацій і винахідництва в галузі техніки : колективна монографія. С. 44-109. Рига, Латвія : Izdevnieciba "Baltija Publishing", 2022. 544 с. 65 с.

#### **Batiuk S.G., Marianski M.O., Salivon D.V., Fedorov D.D. THERMAL ENERGY SYSTEMS OF AUTOMATIC REGULATION WITH STRUCTURAL REGULATORS AND DIGITAL TWINS**

*Increasing the efficiency of systems of automatic regulation (SAR) is an urgent task of industrial automation and is implemented in two parallel directions: 1) improvement of the structure and algorithms of SAR; 2) imitation modeling and research of structures and algorithms of SAR with the aim of their optimal configuration and parameterization. The method of control using the internal model of the control object is an extremely effective method of improving the functioning of industrial SARs. The implementation in the closed-loop regulation of the single-circuit SAR the model of the direct channel of the control object leads to the structuring of classic PID-controllers (structural PID-controllers and gain-scheduled PID-controllers). The implementation in opened-loop compensating links of the combined SAR models of channels of internal and external disturbances of the control object leads to the use of compensators as digital twins of the control object.*

*At the department of automation of energy processes of NTUU of KPI, imitation modeling of improved SAR structures and algorithms was carried out for the purpose of their research and verification. The article presents the results of research in the following thematic directions: 1) development of single-circuit SARs*

with structural PID-controllers; 2) development of single-circuit SAR with gain-scheduled PID-controllers; 3) development of combined SAR with digital twins. The platform for imitation modeling of thermal energy SARs is implemented as the album of models in the Matlab Simulink.

The following conclusions and recommendations are formulated on the basis of the study of the simulated SARs with respect to signal disturbances and the analysis of the sensitivity of the simulated SARs with respect to parametric disturbances: 1) single-circuit SARs with structural PID-controllers are workable and effective, they can easily be implemented with standard functional blocks of modern PLCs and are recommended for industrial use; 2) single-circuit SARs with gain-scheduled PID-controllers are workable and effective, they can easily be implemented with standard functional blocks of modern PLCs and are recommended for industrial use; 3) combined SARs with digital twins are practically inoperable, are basically inferior in efficiency to cascade SARs and are not recommended for industrial use.

**Key words:** thermal energy, cyber-physical system, automated control system, system of automatic regulation, technological processes automation, software-technical means of automation, imitation modeling, PID-controller, digital twin, edge device, supervisory functionality, controller functionality.