

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Л.І. Бугрім, І.С. Білюк

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
"Автоматичні системи керування тепловими
енергетичними системами"

У двох частинах

Частина 1

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електронне видання на CD-ROM

Миколаїв 2010

УДК 621.438-52

Рецензент канд. техн. наук, доц. І.О. Ратушняк

Електронний аналог друкованого видання

Бугрім Л.І., Білюк І.С. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Автоматичні системи керування тепловими енергетичними системами": У 2 ч. – Ч. 1. – Миколаїв: НУК, 2010. – 52 с.

Кафедра автоматики

Описано методику дослідження систем автоматичного регулювання теплоенергетичних об'єктів та їх елементів з використанням ПЕОМ та пакета програм MATLAB.

Наведено будову, принцип дії та математичний опис елементів і систем.

Призначено для студентів Машинобудівного інституту спеціальностей 8.090509 "Суднові енергетичні установки та устаткування", 8.090510 "Теплоенергетика".

© Видавництво НУК, 2010

ВСТУП

Надійна експлуатація теплових енергетичних систем можлива на базі комплексної автоматизації і належної кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Ефективність впровадження засобів автоматизації в значній мірі залежить від якості налагодження автоматичних регуляторів.

Одним із ефективних методів дослідження якості роботи систем автоматичного регулювання (САР) з метою одержання оптимальних параметрів налагодження регуляторів є математичне моделювання. Математичне моделювання ґрунтується на побудові математичних моделей процесів у системі з наступною їх реалізацією на електронних обчислювальних машинах (персональних комп'ютерах).

Для виконання таких робіт необхідно оволодіти методами роботи на ПК і знати можливості, принцип дії та способи реалізації автоматичних регуляторів. Необхідно також вміти одержувати динамічні характеристики САР, виконувати аналіз результатів і використовувати їх для одержання параметрів налагодження автоматичного регулятора, що забезпечують задану якість роботи САР.

Методичні вказівки призначені сприянню у розв'язанні цих задач.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПАКЕТ ПРОГРАМ "MATLAB"

"MATLAB" – це високопродуктивна мова для технічних розрахунків. Вона містить у собі обчислення, візуалізацію і програмування в зручному середовищі, де задачі й розв'язання виражаються у формі, близькій до математичної.

Типовим використанням пакета програм "MATLAB" є математичні обчислення; створення алгоритмів; моделювання; аналіз даних, дослідження і візуалізація; наукова й інженерна графіка; розробка додатків, включаючи створення графічного інтерфейсу.

Simulink, супутня до MATLAB програма, є інтерактивною системою для моделювання динамічних систем. Вона являє собою середовище, кероване мишею, що дозволяє моделювати процес переміщення блоків на екрані та їх маніпуляцією. Simulink працює з лінійними, нелінійними, безперервними, дискретними, багатовимірними системами.

Основним для розробки моделей у Simulink є бібліотеки блоків, з яких складаються структурні схеми систем. Розрахунок перехідних процесів може бути виконаний за допомогою відповідних операцій Simulink–меню або у програмному режимі, використовуючи функції пакета MATLAB.

У середовищі пакета MATLAB можливо не тільки моделювати систему за її структурною схемою, але й отримати математичний опис моделі у різних формах, виконати аналіз її властивостей у часовій та частотній областях, синтезувати елементи системи керування, виконати оптимізацію. Програми MATLAB та Simulink максимально відкриті для розширення та адаптації.

Simulink можна завантажити з командного рядка пакета MATLAB однойменною командою (маленькими буквами): (>> – запрошення MATLAB до вводу команди).

При цьому на екрані відкривається вікно з піктограмами бібліотек блоків Simulink (рис. 1).

Параметри блоків можуть бути константами, змінними, функціями та виразами, які запускаються в MATLAB. Будь-які змінні, від яких залежить параметр, повинні бути визначені в робочій зоні до початку процесу моделювання, інакше Simulink сигналізує про помилку в цьому блоці.

Simulink містить такі бібліотеки блоків (див. рис. 1):

Sources – джерела вхідних сигналів;

Sinks – вихідні блоки (запам'ятовування та реєстрація вихідних сигналів);

Discrete – дискретні блоки;
Continuous – лінійні динамічні блоки;
Nonlinear – нелінійні блоки;
Math – математичні блоки та функції.

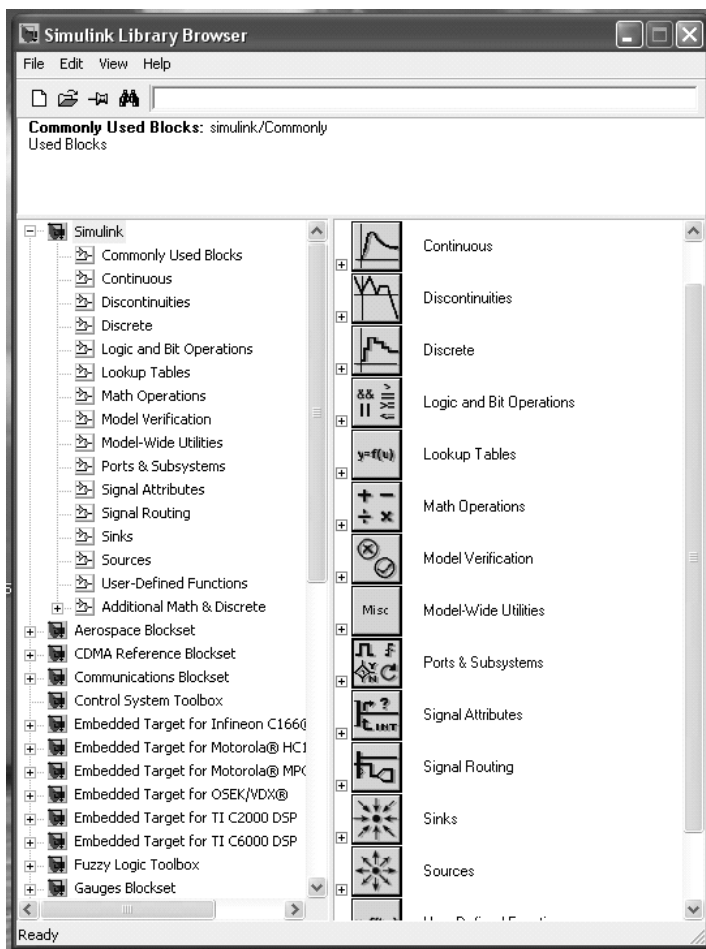


Рис. 1. Вікно бібліотечних блоків Simulink

Кожну бібліотеку можна розкрити подвійним натисканням на ліву кнопку миші. При цьому відкривається вікно з піктограмами її блоків.

Розглянемо деякі бібліотеки Simulink, блоки яких будуть необхідні для моделювання систем.

Бібліотека "Sources" (рис. 2) містить джерела вхідних сигналів, тобто блоки, які не мають входів, а мають тільки виходи.

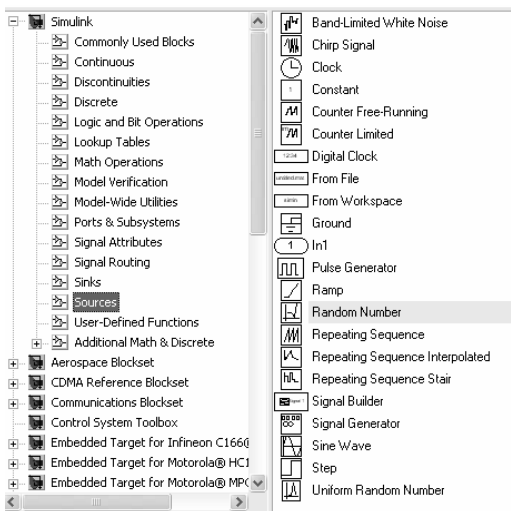


Рис. 2. Вікно бібліотеки "Sources"

Наприклад, у ланці "Constant" можна задавати значення фіксованого сигналу, що діє протягом часу розрахунку (10с за замовчуванням). У ланці "Step" можна задавати стрибкоподібну зміну вхідного сигналу між двома постійними рівнями в заданий момент часу. Є також набір ланок з різними видами сигналів (синусоїда, прямокутний та пилоподібний імпульси, шум).

(To File, To Workspase) та для їх графічного відображення (Score, XY Graph). Блок "Stop Simulation" зупиняє процес моделювання.

Всі перелічені блоки не мають виходів.

Бібліотека "Sinks" (рис. 3) включає блоки, які використовуються для запам'ятовування результатів моделювання

Бібліотека "Continuous" (рис. 4) містить лінійні безперервні ланки, такі, як інтегруюча (Integrator), диференціальна (Derivative), аперіодична (Transfer Fcn).

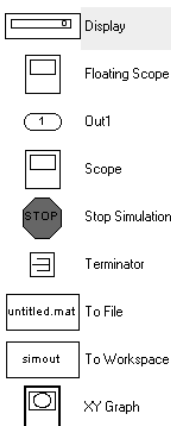


Рис. 3. Вікно бібліотеки "Sinks"

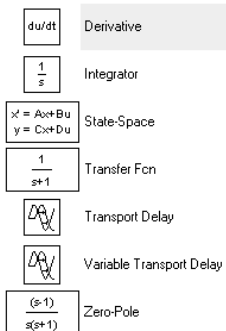


Рис. 4. Вікно бібліотеки "Continuous"

Перед початком формування структурної схеми необхідно відкрити для неї вікно (Simulink → File → New). При цьому відкривається вікно із заголовком "Untitled". Після запису в файл (File → Save / Save As) як заголовок вікна буде фігурувати ім'я файла, що за замовчуванням одержить розширення **m**.

Вже існуючу модель можна завантажити із меню Simulink (File → Open), із меню MATLAB (File → Run M-File) та з командного рядка MATLAB введенням у неї імені файла, в якому збережена модель, без розширення за аналогією з завантаженням файла "Simulink.m".

Копіювання блоків із бібліотек чи з будь-якої вже існуючої моделі у вікно створеного файла після їхнього відкриття виконується мишею за допомогою операції "drag" (тягти при натиснутій лівій клавіші миші). Аналогічно здійснюється переміщення блоків усередині вікна. Копіювання блоків усередині вікна виконується за допомогою операції "drag right" (тягти при натиснутій правій клавіші миші). При цьому до імені нового блоку додається цифра, яка відображає порядковий номер копіювання всередині даного вікна, чим забезпечується унікальність імені кожного блоку, що належить даній моделі.

Перемістити блок у межах одного вікна без ліній зв'язку (витягти блок із моделі) можна операцією "< Shift > + drag". Зв'язки встановлюються між вхідними та вихідними портами блоків. Стрілка на лінії зв'язку показує напрямок потоку даних.

Всі лінії проводяться під кутом 45°. Провести лінію під довільним кутом можна при натиснутій клавіші < Shift > . При проведенні ліній зв'язку не треба намагатися попасти точно в порт; лінія приєднується до порту, якщо Ви відпустите клавішу миші при знаходженні графічного курсору в середині блоку або в безпосередній близькості від порту.

Якщо операцію редагування необхідно виконати для фрагмента структурної схеми, то його слід заздалегідь виділити. З виділеними групами блоків та/або зв'язками можна виконувати ті ж операції, що і з одиничними блоками та/або зв'язками.

Для того щоб провести лінію розгалуження сигналу, необхідно навести мишу на точку розгалуження та натиснути праву клавішу. Потім, не відпускаючи клавішу, необхідно перемістити мишу до входу необхідного блоку та відпустити клавішу.

Для моделювання необхідно на командній панелі натиснути Simulation → Start. Для того щоб побачити перехідний процес, необхідно

розкрити подвійним натисканням на ліву кнопку миші блок Scope на виході моделі (рис. 5).

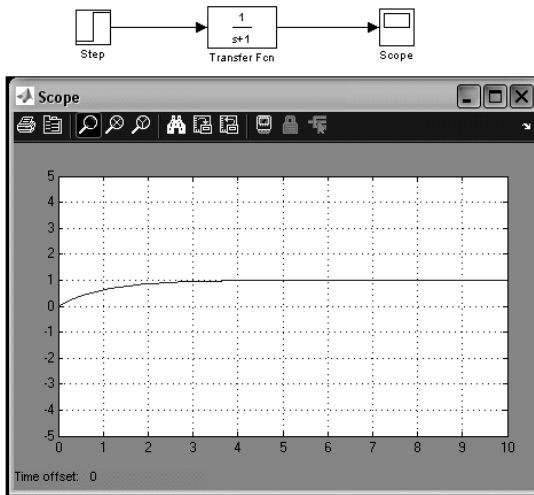


Рис. 5. Приклад моделі та перехідний процес

Лабораторна робота № 1. КОТЕЛ ЯК ОБ'ЄКТ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ В БАРАБАНІ

Мета роботи: 1) вивчення практичних методів реалізації моделей об'єктів регулювання за допомогою пакета програм MATLAB; 2) дослідження динамічних властивостей котла як об'єкта регулювання рівня у барабані.

Основні теоретичні відомості

1. Об'єкти регулювання. Одним із визначень об'єкта регулювання є таке: це пристрій або сукупність пристроїв, де відбувається регульований технологічний процес, і такий пристрій потребує спеціально організованих дій для досягнення поставленої мети управління.

Специфіка систем автоматичного регулювання визначається в основному властивостями й особливостями регульованого об'єкта.

При дослідженні систем регулювання з метою визначення потрібних характеристик регулятора необхідно враховувати і властивості об'єкта регулювання.

У сучасній техніці часто виникає необхідність автоматичного управління об'єктами найрізноманітнішої фізичної природи. До них можна віднести суднові енергетичні установки з двигунами внутрішнього згорання, газовими і паровими турбінами; котлоагрегати, атомні реактори, антени радіолокаційних станцій, об'єкти військової техніки, космічні апарати та інші об'єкти.

Таким чином, під регульованим об'єктом слід розуміти пристрій, технологічний процес, який закінчується виробленням відповідного виду енергії. Кількісні і якісні показники цієї енергії забезпечується за рахунок підтримання її визначаючих параметрів на заданому рівні, тобто за рахунок підтримання роботи установки на заданому режимі.

За видом динамічних характеристик більшість регульованих об'єктів можна розділити на дві групи: статичні й астатичні.

Статичні об'єкти, які ще називають стійкими або такими, що мають самовирівнювання. В таких об'єктах регульована величина при подачі на вхід дії, що збурює або регулює, змінюється на деяку величину і встановлюється нове значення регульованої величини без застосування автоматичного регулятора.

Астатичні об'єкти, нейтральні об'єкти або об'єкти без самовирівнювання. При подачі вхідної дії на виході астатичних об'єктів регулюва-

на величина постійно змінюється і з часом установлюється постійна швидкість зміни регульованої величини.

Вид кривої перехідного процесу $x(t)$ при подачі на вхід стрибкоподібної зміни вхідної дії у малоінерційного (1), інерційного (2) та об'єкта з чистим запізнюванням (3) наведено на рис. 1.1, а і б відповідно.

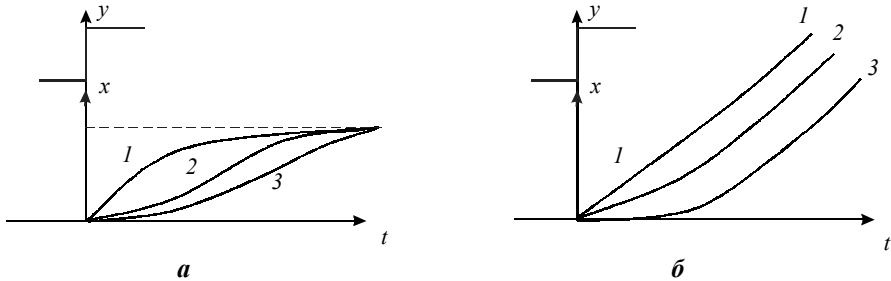


Рис. 1.1. Криві перехідного процесу статичного (а) й астатичного (б) регульованого об'єкта

Зустрічаються також і нестійкі регульовані об'єкти, в яких при тих же умовах регульована величина змінюється зі зростаючою швидкістю.

2. Передаточні функції. Дослідження автоматичних систем спрощується при використанні прикладних математичних методів операційного числення. Це дає можливість перейти від диференційного рівняння до однозначно відповідного йому алгебраїчного рівняння. Такий перехід називають перетворенням по Лапласу.

Також у теорії САР використовують поняття передаточної функції та зображення по Лапласу. Розглянемо коротко загальні уявлення про перетворення по Лапласу.

Якщо є деяка функція $x(t)$ незалежної дійсної змінної, наприклад, часу t , то перетворення по Лапласу, що виконуються над функцією $x(t)$, переводить її у функцію $x(s)$ відповідно до співвідношення

$$x(s) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st} dt,$$

де s – довільна комплексна величина, яку визначають як $s = z \pm i\omega$, де z та ω – матеріальні дійсні змінні.

Таке перетворення скорочено позначають як $x(s) = L\{x(t)\}$ і називають прямим перетворенням по Лапласу. Функція $x(t)$ називається оригіналом, а $x(s)$ – зображенням функції $x(t)$. Такий перехід виконується при

нульових початкових умовах, при $t = 0$ і використовується в технічних задачах після подачі вхідних дій, а це якраз і становить практичний інтерес при розв'язанні задач автоматичного регулювання.

В загальному випадку оригінал функції $x(t)$ знаходиться за зображенням шляхом оберненого перетворення Лапласа:

$$x(t) = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \int_{z-i\omega}^{z+i\omega} x(s) e^{st} ds.$$

Операція оберненого перетворення позначається символом L^{-1} або $1/L$, тобто

$$x(t) = L^{-1} \{x(s)\}.$$

Перетворення по Лапласу, що частіше використовуються при розрахунках з автоматики, наведені в табл. 1.1.

Передавальною функцією елемента (системи) називається відношення зображення по Лапласу вихідної координати до зображення по Лапласу вхідної координати при нульових початкових умовах. Якщо позначити передавальну функцію чезер $W(s)$, то можна записати:

Таблиця 1.1.

$x(t)$ (оригінал)	$x(s)$ (зображення)
$k \cdot x(t)$	$k \cdot x(s)$
$x_1(t) \pm x_2(t)$	$x_1(s) \pm x_2(s)$
$d[x(t)]/dt$	$s \cdot x(s)$
$d^n[x(t)]/dt^n$	$s^n \cdot x(s)$
$\int x(t) dt$	$(1/s) \cdot x(s)$
$x(t - \tau)$	$e^{-s\tau} \cdot x(s)$

$$W(s) = x_{\text{вих}}(s) / x_{\text{вх}}(s).$$

3. Рівняння динаміки парового котла із природною циркуляцією. Котел як об'єкт регулювання рівня в барабані залежно від типу економайзера має різні динамічні властивості.

Використаємо експериментальний метод одержання рівняння динаміки.

На рис. 1.2, *a, б*, зображено криві зміни рівня в барабані різних котлів при стрибкоподібному збільшенні відбору пари (навантаження) на 5 кг/с, коли витрата живильної води не змінювалась. З розглянутих кривих видно, що котел як об'єкт регулювання рівня не є простою інтегруючою лан-

кою, коли використовується не "киплячий" економайзер, як відкритий бак з водою.

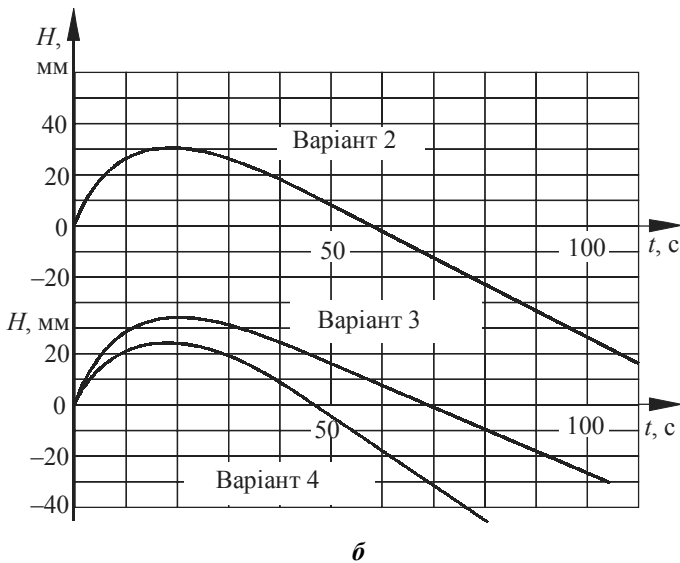
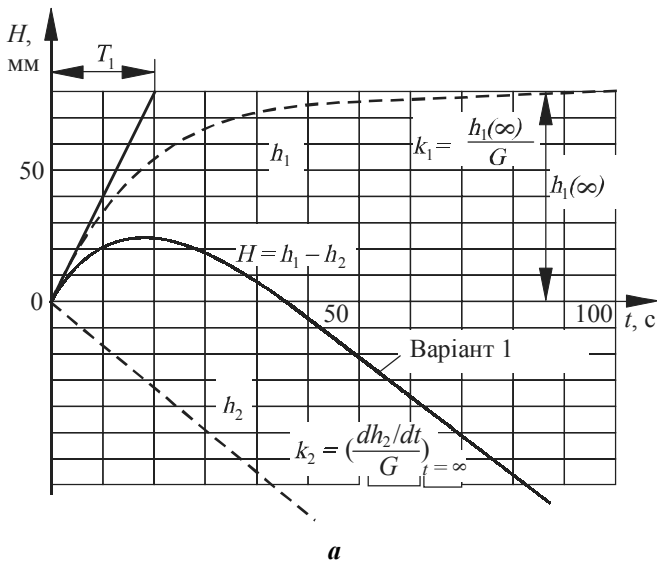


Рис. 1.2. Зміна рівня в барабанах різних котлів при стрибкоподібному збільшенні відбору пари

Справа в тому, що густина рідини в баці незмінна, у той час як густина пароводяної суміші в котлі змінюється разом з його навантаженням, тиском пари, температурою води тощо.

При різкому збільшенні відбору пари з котла в перший момент відбувається "набрякання" рівня води, викликане інтенсивним пароутворенням за рахунок підвищеної теплоємності котлової води стосовно тиску пари, що знизився. І навпаки, при зменшенні навантаження тиск пари в котлі на якийсь час збільшується й рівень води знижується, незважаючи на інтенсивне живлення котла водою. Величина й тривалість цих закидів залежить від параметрів котла.

Коли експериментальна крива перехідного процесу отримана, її необхідно подати у вигляді суми перехідних процесів двох ланок, що включені паралельно – аперіодичної та інтегруючої. У цьому випадку котел як об'єкт регулювання рівня може бути представлений системою рівнянь:

$$T_1 \frac{dh_1}{dt} + h_1 = k_1 G; \quad (1.1)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = k_2 (W - G); \quad (1.2)$$

$$H = h_1 - h_2, \quad (1.3)$$

де G і W – зміна витрати пари (навантаження) і живильної води відповідно; h_1 , h_2 і H – дві складові перехідного процесу й величина зміни рівня води в барабані котла відповідно.

Структурна схема котла як об'єкта регулювання рівня в барабані зображена на рис. 1.3.

Коефіцієнти рівнянь (1.1) і (1.2) T_1 , k_1 і k_2 отримують шляхом обробки двох складових перехідного процесу (див. рис. 1.2).

Використовуємо криві перехідних процесів (див. рис. 1.2) і отримуємо коефіцієнти рівнянь (1.1) і (1.2). На рис. 1.2, а показано, як криву перехідного процесу H (цільна крива) розкладено на дві криві, представлені елементарними ланками (пунктирні криві): аперіодичною, що відображає першу

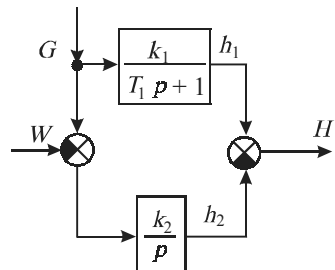


Рис. 1.3. Структурна схема котла як об'єкта регулювання рівня в барабані

складову h_1 , та інтегруючою, що відображає складову h_2 . Для аперіодичної ланки необхідно отримати два коефіцієнти передавальної функції k_1 і T_1 . Коефіцієнт передачі k_1 отримаємо з виразу

$$k_1 = \frac{h_1(\infty)}{G} = \frac{80}{5} = 16 \text{ мм}/\left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right).$$

У цьому випадку $h_1(\infty) = 80$ мм, що визначається з кривої $h_1(t)$; $G = 5$ кг/с – величина зміни витрати пари, що задана умовою задачі; стала часу $T_1 = 20$ с, як значення відрізка часу від початку перехідного процесу $h_1(t)$ до перетину дотичної з лінією $h_1(\infty) = 80$ мм.

Для другої складової h_2 , що подана у вигляді інтегруючої ланки, необхідно одержати коефіцієнт передачі $k_2 = \left(\frac{\Delta h_2}{\Delta t}\right) / G = \left(\frac{48}{30}\right) / 5$, де відповідно до $h_2(t)$ (див. рис. 1.2,а) видно, що за відрізок часу $\Delta t = 30$ с h_2 зменшується на 48 мм, а G , як і раніше дія, що збурює.

Криві перехідних процесів для варіантів 2–4 приведені на рис. 1.2,б.

Схему набору моделі котла як об'єкта регулювання рівня у барабані у програмі Simulink наведено на рис. 1.4.

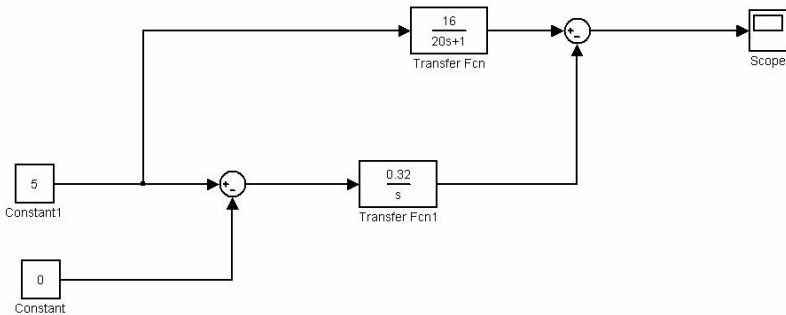


Рис. 1.4. Схеми набору моделі котла як об'єкта регулювання рівня в барабані у програмі Simulink

Порядок виконання роботи

1. Визначити за рис. 1.2,б коефіцієнти k_1 , T_1 , k_2 відповідно до заданого викладачем варіанта.
2. Запустити програму Simulink.
3. Виконати моделювання котла як об'єкта регулювання рівня в ба-

рабані у програмі Simulink згідно зі структурною схемою і моделлю, що зображені відповідно на рис. 1.3 та 1.4, використовуючи коефіцієнти отримані в п. 1.

4. У Simulink отримати динамічні характеристики котла як об'єкта регулювання рівня в барабані, при подачі збурюючого впливу, коли витрата живильної води не змінюється кг/с.

5. Отримати для випадку, що досліджується у п. 4, окремо динамічні характеристики аперіодичного та інтегруючого ланцюгів.

6. Отримати динамічні характеристики котла як об'єкта регулювання рівня в барабані при подачі живильної води $W = 5$ кг/с, коли витрата пари (навантаження) не змінюється ($G = 0$ кг/с).

Обробка результатів дослідження

1. За графіками, отриманими у п. 4–5, визначити коефіцієнти k_1 , T_1 , k_2 та порівняти їх з отриманими за рис. 1.2,б.

Зміст звіту

Звіт повинен містити наступні дані:

1. Рівняння котла як об'єкта регулювання рівня.
2. Структурну схему котла як об'єкта регулювання рівня.
3. Схему набору моделі котла як об'єкта регулювання рівня в барабані у програмі Simulink.
4. Отримані динамічні характеристики.
5. Висновки щодо роботи.

Питання для самоперевірки та захисту

1. Поняття об'єкта регулювання.
2. Розподіл об'єктів регулювання за видом динамічних характеристик.
3. Поняття динамічної характеристики. Види динамічних характеристик.
4. Фізичне розуміння сталої часу і коефіцієнта передачі в рівнянні об'єкта регулювання.
5. Дії, що збурюють та регулюють, на прикладі котла як об'єкта регулювання рівня.
6. Поняття про самовирівнювання і фактор стійкості.

Лабораторна робота № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОХІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЯТОРА РІВНЯ ВОДИ В БАРАБАНІ КОТЛА

Мета роботи: 1) вивчення роботи двохімпульсного регулятора рівня; 2) дослідження впливу імпульсу по витраті пари (навантаження на котел) на якість процесу регулювання.

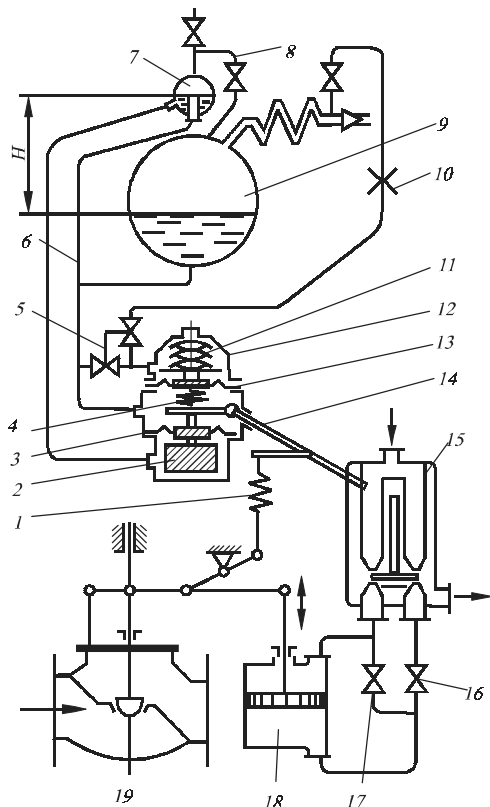
Основні теоретичні відомості

1. Опис роботи системи. Регулятор рівня здійснює регулювання подачі живильної води в котел. Котел як об'єкт регулювання рівня є інтегруючою ланкою, можливість застосування інтегрального регулятора виключена, тому що система вийшла б структурно нестійкою. З цієї причини виконавчий елемент-сервомотор, що є також інтегруючою ланкою, необхідно охопити жорстким зворотним зв'язком. Отриманий у такий спосіб пропорційний одноімпульсний регулятор мав би значну помилку регулювання, тому що для зменшення коливальності й часу регулювання довелось б установити мале значення коефіцієнта підсилення регулятора. А це небезпечно, особливо для високонапірних котлів. Тому з метою стабілізації системи регулювання рівня в цьому випадку застосовується регулятор із жорстким зворотним зв'язком, а для зменшення або навіть зміни знака помилки регулювання вводиться, крім основного імпульсу по відхиленню рівня H , імпульс по відхиленню витрати пари G . Такий двохімпульсний регулятор поєднує принципи регулювання по відхиленню й по навантаженню.

Схема двохімпульсного регулятора рівня, що використовується на судах з паросиловими установками вітчизняного виробництва, зображена на рис. 2.1. Вимірювальний орган регулятора має дві мембрани: мембрану рівня 3 мембрану витрати 13, що встановлені в корпусі вимірювального органа 12. Над паровим колектором 9 котла розташовано конденсаційну посудину 7, рівень у якій підтримується постійним за рахунок зливу в нижню частину парового колектора. Конденсаційна посудина 7 трубками 8 і 6 з'єднана з паровим та водяним просторами парового колектора. Середня порожнина вимірювального органа сполучається з водяним простором парового колектора і паровим простором конденсаційної посудини, нижня – з водяним об'ємом конденсаційної посудини. Таким чином, на мембрану рівня діє спрямована нагору сила, що обумовлена площею мембрани й тиском, що залежить від висоти H стовпа рідини між постійним рівнем у конденсаційній посудині й змінним у колекторі котла. Тим самим мембрана вимірює значення рівня в колекторі.

Рис.2.1. Принципова схема двохімпульсного регулятора рівня води в барабані котла:

1 – жорсткий пружинний зворотний зв'язок; 2 – вантаж; 3 – мембрана рівня; 4 – імпульсна пружина; 5 – заблоковані клапани; 6 – трубка; 7 – конденсаційна посудина; 8 – трубка; 9 – паровий колектор; 10 – дросельна шайба; 11 – пружина; 12 – вимірювальний орган; 13 – мембрана витрати пари; 14 – важелі регулятора; 15 – водяне підсилювальне реле; 16 – дросельний клапан; 17 – обхідний клапан; 18 – сервомотор; 19 – живильний клапан



Верхня порожнина вимірювального органа 12 з'єднана з магістраллю свіжої пари, що відбирається від котла. Отже, мембрана витрати пари вимірює перепад тиску на ділянці від парового колектора до точки відбору імпульсу в трубопроводі свіжої пари. Оскільки переріз паропроводу незмінний, цей перепад пропорційний витраті пари G . Між порівняльним важелем 14 регулятора й мембраною витрати пари 13 встановлена імпульсна пружина 4, що завжди стиснена. Зі збільшенням навантаження котла тиск у верхній порожнині вимірювального органа 12 зменшується і мембрана витрати 13, переміщуючись нагору, частково розвантажує імпульсну пружину. Обидва впливи – за рівнем і витратою пари – складаються на порівняльному важелі 14 регулятора й трансформуються в переміщення регулюючої заслінки водяного підсилювального реле 15. При відхиленні заслінки – змінюється тиск води в одній з порожнин сервомотора 18, сервомотор переміщає шток живильного клапана 19. Зворотне переміщення заслінки здійснюється через жорсткий пружинний зворотний зв'язок 1.

Якщо в рівноважному стані регулятора сила, що діє на мембрану рівня й визначається висотою стовпа рідини H , була б урівноважена тільки натягами пружин (імпульсної та зворотного зв'язку), то при хитавиці судна рівновага системи регулювання порушилася б. Дійсно, при крені висота стовпа води зменшилася б і стала рівною $H \cos \beta$, де H – висота зазначеного стовпа при горизонтальному положенні судна; β – кут крену. Система зазнала би впливу періодичної зовнішньої сили й робила б змушені коливання. Щоб уникнути цього, значна частина сили, що обумовлена тиском стовпа рідини H , урівноважується підвищенням до мембрани рівня вантажем 2. При хитавиці судна складова маси вантажу, що діє на мембрану рівня, змінюється за таким же законом, що й висота стовпа рідини H , і рівновага системи не порушується.

Перепад тисків пари між барабаном котла й паропроводом після пароперегрівника пропорційний квадрату швидкості пари, тобто витраті пари з котла. Для того щоб переміщення мембрани було лінійною функцією витрати пари, необхідно жорсткість пружини 11 зробити змінною. Це досягається шляхом установки над мембраною витрати 13 трьох пар пластинчастих пружин. При стискуванні пружини послідовно лягають на упори, і їхня загальна характеристика досить точно апроксимує квадратичну параболу.

Для запобігання розриву мембрани витрати при дії однобічного тиску в імпульсних трубопроводах встановлено два зблокованих клапани 5, так що відкриття одного можливе лише при одночасному закритті другого. За допомогою цих клапанів верхня порожнина вимірювального органа може бути з'єднана з його середньою порожниною та з паровим колектором у випадку, якщо відсутній тиск в імпульсному трубопроводі, що з'єднує верхню порожнину з магістраллю свіжої пари. Нижня й середня порожнини вимірювального органа 12 завжди з'єднані між собою через імпульсні трубопроводи й конденсаційну посудину.

Дросельний клапан 16 у силовому трубопроводі, що йде від одного із прийомних сопел підсилювального реле 15 до корпусу сервомотора, дозволяє змінювати швидкість переміщення поршня сервомотора і є налагоджувальним елементом. Обхідний клапан 17 служить для переходу на ручне керування (для цього досить відкрити кран, з'єднавши обидві порожнини сервомотора).

Дросельна шайба 10 , встановлена в імпульсній трасі по витраті пари, дозволяє сповільнити дію імпульсу по навантаженню, що зменшує перший динамічний закид при різкій зміні впливу, що збурює.

Регулятори рівня розраховують і виготовляють так, щоб статична характеристика системи регулювання (у координатах рівень – наванта-

ження на котел по витраті пари) була падаючою з невеликою нерівномірністю регулювання. На більших навантаженнях котла рівень доцільно підтримувати трохи меншим, тому що зі зростанням навантаження швидкість виходу пари із дзеркала випару збільшується, і високий рівень може призвести до збільшення вологості пари. Але разом з тим рівень на максимальному навантаженні котла не повинен бути занадто низьким через небезпеку його зменшення нижче припустимої межі при різкому зменшенні відбору пари з котла. Звичайне значення нерівномірності регулювання в системі регулювання рівня води в котлі вибирається порядку 30 мм. У деяких випадках прийнятна з погляду експлуатації нерівномірність регулювання виявляється достатньою для стійкості й при одноімпульсному регуляторі рівня (без вимірювання витрати пари з котла), що спрощує схему регулятора рівня.

2. Рівняння динаміки регулятора. Регулятор складається з датчика 12 (див. рис. 2.1) підсилювача 15, важільної системи й пружини зворотного зв'язку 1. Отримування рівнянь вимірювального пристрою, підсилювача й сервомотора наведено у роботі.

Структурна схема САР зображена на рис. 2.2. Тут суматори 1 і 3, а також ланки 2 і 4 являють собою вимірювальний пристрій. Його вихідний сигнал α – кут повороту валика, на якому порівнюються моменти, створювані вимірником 12 і пружиною зворотного зв'язку 1 (див. рис. 2.1), що мають передаточні функції k_n і $k_{зз}$ відповідно. Вимірник реагує на різницю тисків $h - H$, які створюють датчик витрати (h) і датчик рівня (H).

Датчик витрати представлений аперіодичною ланкою 8 (див. рис. 2.2), коефіцієнт підсилення якого k_d зв'язує зміну перепаду тиску h [мм вод. ст.] і зміну навантаження на котел G . Стала часу ланки T_d

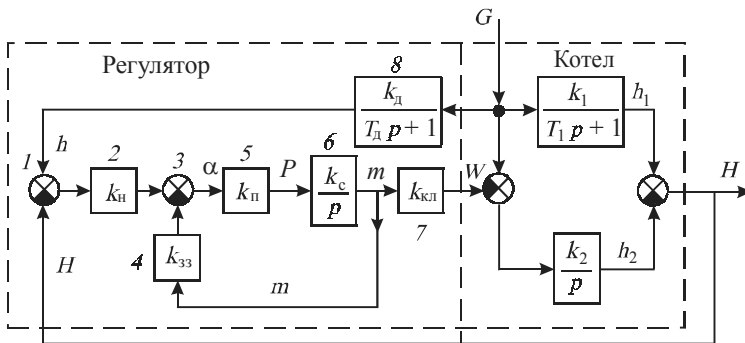


Рис. 2.2. Структурна схема САР рівня в барабані котла

залежить від діаметра дросельної шайби 1θ та об'єму пари між верхньою мембраною вимірника 12 (див. рис. 2.1) і місцем установки дроселя. Для збільшення T_d можна, крім зменшення діаметра дроселя, ще підключати додатковий об'єм (ресивер) в імпульсну трасу. Безінерційною ланкою 5 та інтегруючою 6 (див. рис. 2.2) представлені відповідно підсилювач і сервомотор. Тут P – перепад тиску в прийомних соплах підсилювача, а m – переміщення штока клапана. Ланкою 7 представлений клапан (регулюючий орган).

Величину k_c можна змінювати за допомогою клапана 16 (див. рис. 2.1), а величину $k_{кл}$ – шляхом зміни профілю тарілки (профілю плунжера або співвідношення пліч важільної передачі, що приєднує виконавчий механізм до штока клапана).

Рівняння регулятора в абсолютних відхиленнях може бути подано у вигляді рівнянь датчика витрати (2.1), вимірювального пристрою (2.2) і підсилювача разом із сервомотором (2.3) та клапана (2.4):

$$T_d \frac{dh}{dt} + h = k_d G; \quad (2.1)$$

$$\alpha = k_H (h - H) - k_{33} m; \quad (2.2)$$

$$\frac{dm}{dt} = k_{\Pi} k_c \alpha; \quad (2.3)$$

$$W = k_{кл} m. \quad (2.4)$$

Виключимо α і m , підставивши їхні значення з (2.2), (2.4) у (2.3), отримаємо рівняння регулятора:

$$\frac{1}{k_{кл}} \frac{dW}{dt} + \frac{k_{33}}{k_{кл}} W = k_{\Pi} k_c k_H (h - H),$$

або

$$T \frac{dW}{dt} + W = k (h - H), \quad (2.5)$$

де $T = 1/k_{33}$; $k = k_{\Pi} k_c k_H k_{кл} / k_{33}$ – стала часу й коефіцієнт передачі регулятора відповідно.

Отже, математичний опис САР буде представлено рівняннями об'єкта регулювання (1.1)–(1.3), рівнянням регулятора (2.5) і датчика витрати (2.1).

Коефіцієнти рівнянь (1.1)–(1.2) отримано в роботі 1 шляхом обробки експериментальних кривих (див. рис. 1.2), а для рівнянь (2.1), (2.5) бере-мо з табл. 2.1 відповідно до заданого варіанта.

Таблиця 2.1

Варіант	T с	k (кг/с)/мм	T_d с	k_d (кг/с)/мм
1	5; 10; 15	0,1; 1; 1,5	4	1
2	4; 10; 15	0,2; 1; 1,5	10	5
3	3; 10; 15	0,3; 1; 1,5	6	3
4	2; 10; 15	0,4; 1; 1,5	2	1

Структурна схема САР після представлення системи рівнянь, що описують регулятор одним рівнянням (2.5), має вигляд, показаний на рис. 2.3.

Максимальні значення

змінних: $H_{\max} = h_{\max} = h_{1\max} = h_{2\max} = 100$ мм; $G_{\max} = W_{\max} = 5$ кг/с.

Схему набору моделі САР рівня у Simulink наведено на рис. 2.4.

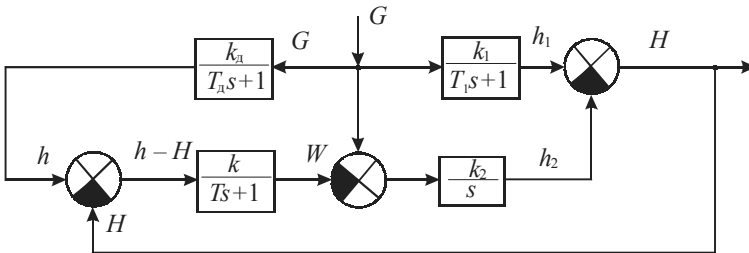


Рис. 2.3. Структурна схема САР рівня в барабані котла, коли регулятор представлено однією ланкою

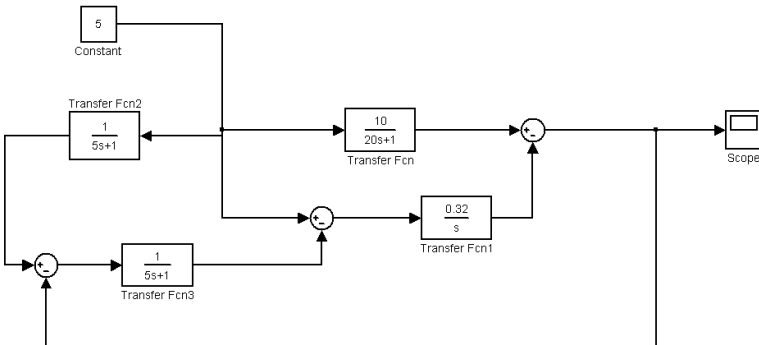


Рис.2.4.Схема набору САР рівня у програмі Simulink

Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Simulink.
2. Визначити коефіцієнти k_1 , T_1 та k_2 відповідно до заданого викладачем варіанта (або використати результати роботи 1).
3. Виконати моделювання САР відповідно до системи, зображеної на рис. 2.4, і для даних, наведених у табл. 2.1.
4. У Simulink одержати перехідні функції САР при подачі збурювального впливу $G = 5$ кг/с і при зміні параметрів налагодження регулятора.

Обробка результатів дослідження

1. За графіками визначити показники якості перехідних процесів: пере регулювання – σ , час регулювання – t_p , статичну помилку – δ .
2. Побудувати функціональні залежності показників якості від значень коефіцієнтів k , T .
3. Проаналізувати одержані результати і визначити значення коефіцієнтів k , T , що забезпечують перехідні процеси з кращими показниками якості.
4. Зробити висновки про вплив параметрів налагодження на показники якості САР.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Рівняння динаміки об'єкта й регулятора.
2. Наведені системи рівнянь до машинного виду.
3. Схему набору моделі САР рівня в Simulink.
4. Криві перехідних процесів, побудовані в абсолютних відхиленнях реальних змінних.
5. Результати обробки отриманих перехідних процесів – функціональні залежності показників якості від значень коефіцієнтів k , T .
6. Висновки щодо роботи.

Питання для самоперевірки та захисту

1. Робота САР рівня з двохімпульсним регулятором.
2. Чим викликано введення двохімпульсного регулятора?
3. Отримати коефіцієнти рівнянь ємності як об'єкта регулювання рівня по експериментальній перехідній характеристиці.

4. Виконати класифікацію САР рівня.
5. Назвати елементи САР згідно з їх функціональним призначенням.
6. Пояснити, як були отримані показники якості роботи і що вони визначають.
7. Пояснити, в чому сутність статичного й астатичного об'єктів регулювання і до якого виду належить об'єкт регулювання в лабораторній роботі.
8. Який закон роботи автоматичного регулятора реалізується в системі, що досліджується в лабораторній роботі.

Лабораторна робота № 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ Й РІВНЯ ВОДИ В БАРАБАНІ КОТЛА

Мета роботи: 1) вивчення системи автоматичного регулювання тиску пари; 2) вивчення роботи трьохімпульсного регулятора рівня з додатковим імпульсом по швидкості зміни тиску пари; 3) дослідження впливу імпульсу по швидкості зміни тиску пари на динаміку регулювання рівня.

1. Опис роботи системи. Для регулювання тиску пари звичайно застосовують регулятор із жорстким (силовим) зворотним зв'язком. Принципова схема типового для суден вітчизняного виробництва гідравлічного регулятора тиску пари зображена на рис. 3.1. Регулятор вимірює тиск у магістралі свіжої пари за допомогою сильфона 5. Зусилля від сильфона врівноважується натягом задавальної пружини 3 і пружини зворотного зв'язку 6. У випадку порушення рівноваги відхиляється регулююча заслінка струминного підсилювача 4, через що збільшується тиск в одній з порожнин сервомотора 11. Поршень сервомотора, переміщуючись, приводить через кривошипно-шатунний механізм і зубчасту передачу в обертання вал 9, що пов'язаний з регулювальними органами подачі палива 8.

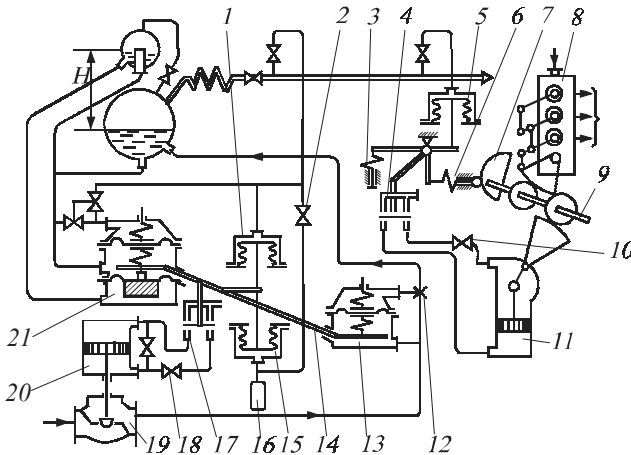


Рис. 3.1. Принципова схема системи автоматичного регулювання тиску й рівня з додатковим імпульсом по швидкості зміни тиску в котлі:

- 1 – сильфон; 2 – дросельний кран; 3 – задавальна пружина; 4 – підсилювальне реле; 5 – сильфон; 6 – пружина зворотного зв'язку; 7 – лекало зворотного зв'язку; 8 – регулювальний орган подачі палива; 9 – вал; 10 – дросельний кран; 11 – сервомотор; 12 – кран; 13 – вимірник; 14 – валик; 15 – сильфон; 16 – ємність; 17 – підсилювач; 18 – дросельний кран; 19 – клапан; 20 – сервомотор; 21 – вимірювальний пристрій

Вода витісняється з порожнини сервомотора через підсилювальне реле 4. На валу 9 розміщується лекало 7 зворотного зв'язку, що впливає на пружину 6 зворотного зв'язку через штовхач із роликом.

Система має падаючу статичну характеристику регулювання, тобто в місці відбору імпульсу тиск на різних статичних режимах не є постійним, а зменшується зі зростанням навантаження на котел. Для того, щоб у паровому колекторі котла тиск при збільшенні навантаження мало змінювався, місце відбору імпульсу вибирають у паропроводі свіжої пари (наприклад, за стопорним клапаном котла). Тоді тиск у колекторі буде більший за тиск у місці відбору імпульсу на величину падіння тиску, обумовленого гідравлічними опорами на ділянці паропроводу від колектора до місця відбору імпульсу.

Зі зростанням навантаження котла по парі зменшується тиск у місці відбору імпульсу через властиву системі нерівномірність регулювання, але одночасно збільшується перепад тиску між колектором та місцем відбору імпульсу внаслідок зростання гідравлічних опорів при збільшенні витрати пари та її швидкостей, так що тиск у колекторі виявляється майже постійним. При цьому тиск у котлі на середніх навантаженнях підтримується трохи меншим, ніж на малому й повному навантаженнях, через те, що падіння тиску в паропроводі є квадратичною функцією витрати пари, а статична характеристика регулювання лінійна або майже лінійна, тому що величина статичної помилки регулювання приймається рівною максимальному значенню зазначеного падіння тиску й становить звичайно 10...15 % від номінального тиску.

Регулятор рівня води в барабані котла реагує на чотири імпульси: зміну рівня (нижня мембрана вимірника 21), витрату пари (верхня мембрана), зміну витрати живильної води (вимірник 13), на швидкість зміни тиску пари (сильфони 1, 15, дросельний кран 2 і ємність 16). Усі ці імпульси підсумовуються у вимірювальному органі й наступній ланці регулятора – підсилювачі 17 – де діє сумарний імпульс.

Дія додаткових імпульсів по витраті пари й води на регулятор рівня принципово різна. Якщо імпульс по витраті пари є зовнішнім для регулятора і вводиться в нього для корегування статичної характеристики регулювання рівня при наявності жорсткого зворотного зв'язку, то імпульс по витраті води – внутрішній робить стабілізуючу дію на контур, аналогічній дії жорсткого зворотного зв'язку, оскільки витрата води й переміщення регулюючого живильного клапана пов'язані з його витратною характеристикою.

Перевага регулятора з імпульсом по витраті води перед регулятором із жорстким зворотним зв'язком полягає в тім, що в першому ста-

тична характеристика контуру регулювання рівня не залежить від витратної характеристики регулюючого живильного клапана і стабільна в тривалих умовах експлуатації. Конструкція регулятора з імпульсом по витраті води складніша, ніж регулятора із жорстким зворотним зв'язком механічного (силового) типу.

Тому реалізація жорсткого зворотного зв'язку введенням у регулятор імпульсу по витраті води доцільна у двох випадках. По-перше, коли за умовами розміщення вимірювальний і підсилювальний органи доводиться встановлювати на такій відстані від виконавчого механізму, що застосування жорсткого зворотного зв'язку (кінематичного або силового типу) конструктивно неможливо. По-друге, коли витратна характеристика регулюючого живильного клапана в умовах експлуатації установки може значно мінятися й змінювати вид статичної характеристики контуру регулювання, стабілізованого жорстким зворотним зв'язком по положенню поршня сервомотора. Нестабільність цієї характеристики може бути наслідком нестабільності характеристики напірного живильного трубопроводу й, отже, перепаду тиску на регулюючому живильному клапані, або площі його прохідного перетину.

Динамічний кидок рівня, обумовлений явищем "набрякання", проявляється досить помітно при одно-, дво- і трьохімпульсних регуляторах. При одноімпульсному регулюванні зменшення надходження живильної води в котел виконується лише в міру того, як збільшується рівень, а при дво- і трьохімпульсних регуляторах подача води навіть збільшується при набряклому рівні завдяки впливу імпульсу по витраті пари.

При різкому збільшенні витрати пари (навантаження на котел) у перший момент відбувається падіння тиску в барабані котла. Вода в ньому виявляється пересиченою і відбувається її об'ємне скипання. Збільшення кількості пари під дзеркалом випару приводить до "набрякання" рівня. Регулятор тиску включається в роботу і збільшує подачу палива та повітря в топку котла. Тиск починає відновлюватися, що приводить до зменшення об'єму пари під дзеркалом випару й до падіння рівня. Імпульс по швидкості зміни тиску пари в котлі, відмінний від нуля тільки протягом перехідного процесу зміни тиску пари й дорівнює нулю в статиці, може істотно зменшити прояв набрякання. Вимірник швидкості зміни тиску представлений у вигляді двох однакових, але зустрічно включених сильфонів 1 й 15. Завдяки дроселю 2 і об'єму 16 рівновага валика 14 буде порушуватися під час зміни тиску пари, тому що в статиці тиск у сильфонах буде однаковим. Дросель повинен бути встановлений таким чином, щоб зменшення тиску пари приводило до додаткового закриття клапана 19 і навпаки.

Функціональна схема, що складена відповідно до рис. 3.1, приведена на рис. 3.2, де РТ і РР – регулятори, відповідно, тиску і рівня; КТ і КР – котел як об'єкт регулювання тиску і рівня.

2. Рівняння динаміки окремих елементів системи. Рівняння динаміки, записані у відносних відхиленнях від базового сталого режиму, мають вигляд:

рівняння динаміки котла, як об'єкта регулювання тиску:

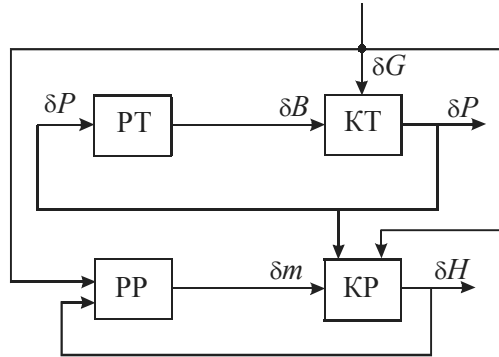


Рис.3.2. Функціональна схема САР тиску і рівня з додатковим імпульсом по швидкості зміни тиску в котлі

$$T \frac{d\delta P}{dt} + \delta P = -\delta G + \delta B, \quad (3.1)$$

де $\delta P = \Delta P / P_n$ – відносна зміна тиску; $\delta G = \Delta G / G_n$ – відносна зміна витрати пари з котла (навантаження); $\delta B = \Delta B / B_n$ – відносна зміна витрати палива; індексом "n" позначені величини на номінальному режимі; рівняння регулятора тиску пари в котлі:

$$T_m \frac{d\delta B}{dt} + \delta B = -k_m \delta P; \quad (3.2)$$

рівняння динаміки котла, як об'єкта регулювання рівня:

$$T_p \frac{d\delta H}{dt} = -\delta G + \delta m - T_{m1} \frac{d\delta P}{dt}, \quad (3.3)$$

де $\delta H = \Delta H / H_n$ – відносна зміна рівня; $\delta m = \Delta m / m_n$ – відносне переміщення штока живильного клапана;

рівняння регулятора рівня

$$T_c \frac{d\delta m}{dt} + \delta m = -k_n \delta H + k_G \delta G \pm T_K \frac{d\delta P}{dt} - k_W \delta W, \quad (3.4)$$

де $k_G = k_W$; $\delta W = \Delta W / W_H$ – відносна зміна витрати живильної води; індексом "с" позначені величини що стосуються сервоприводу.

Прийемо, що характеристика живильного клапана лінійна і спеціальний регулятор перепаду підтримує на ньому постійний перепад, тоді в рівнянні (3.4) можна прийняти $\delta W = \delta m$ і воно прийме вигляд:

$$T_c \frac{d\delta m}{dt} + (1 + k_w)\delta m = -k_H \delta H + k_G \delta G \pm T_k \frac{d\delta P}{dt}. \quad (3.5)$$

Отже, динаміка котла й регуляторів буде представлена системою рівнянь (3.1–3.3) і (3.5).

Запишемо (3.1) у вигляді:

$$\frac{d\delta P}{dt} = (-\delta G + \delta B - \delta P) \cdot k_1; \quad \delta P = \int \frac{d\delta P}{dt}, \quad (3.6)$$

де $k_1 = 1/T$.

При такому записі є можливість отримати похідну $d\delta P/dt$ на виході одного із блоків схеми моделювання, що буде реалізована на ПК і використати цю похідну в рівняннях (3.3) і (3.5).

Запишемо рівняння (3.3) і (3.5) в вигляді, що відповідає елементарним ланкам:

$$\frac{d\delta H}{dt} = (-\delta G + \delta m - T_{ap} \cdot \frac{d\delta P}{dt})k_2; \quad (3.7)$$

$$T_{c1} \cdot \frac{d\delta m}{dt} + \delta m = -k_3 \cdot \delta H + k_4 \cdot \delta G \pm k_5 \cdot \frac{d\delta P}{dt}, \quad (3.8)$$

де $k_2 = \frac{1}{T_p}$; $T_{ap} = \frac{T_{m1}}{T_p}$; $T_{c1} = \frac{T_c}{1+k_w}$; $k_3 = \frac{k_H}{1+k_w}$; $k_4 = \frac{k_G}{1+k_w}$; $k_5 = \frac{T_k}{1+k_w}$.

Згідно рівнянь (3.2), (3.6)–(3.8) і функціональній схемі (рис. 3.3) складемо структурні схеми САР, що має бути реалізована на ПК, в загальному вигляді. Значення T_c і T_m встановлюються дросельними кранами 10 та 18 відповідно.

Чисельні значення коефіцієнтів наведені в табл. 3.1.

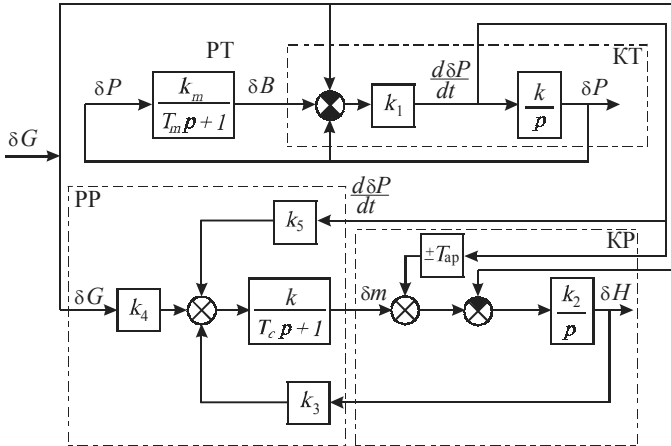


Рис. 3.3. Структурна схема САР тиску і рівня з додатковим імпульсом по швидкості зміни тиску в котлі в загальному вигляді

Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Simulink.
2. Виконати моделювання САР згідно до рис. 3.4 і встановити коефіцієнти відповідно до заданого викладачем варіанту. При цьому у блоці Transfer Fcn (див. рис. 3.4) встановити наступні коефіцієнти $k = 1$, $T = 100$ с.
3. Отримати у Simulink три перехідні функції δP (блок Scope) при фіксованих параметрах налагодження регулятора рівня k , T_c (блок Transfer Fcn 3), регулятора тиску T_m (блок Transfer Fcn 1) та змінному параметрі регулятора тиску k_m (блок Transfer Fcn 1).
4. Визначити згідно отриманих у п. 3 перехідних функцій параметр налагодження регулятора тиску k_m , що забезпечує перехідний процес з найкращими показниками якості.
5. Отримати у Simulink дев'ять перехідних функцій δH (блок Scope 1) при фіксованих параметрах налагодження регулятора тиску k_m , T_m (Transfer Fcn 1), визначених згідно п. 4, та змінних параметрах регулятора рівня k , T_c (блок Transfer Fcn 3).
6. Визначити згідно отриманих у п. 5 перехідних функцій параметри

Таблиця 3.1

Вар	δG	Котел по тиску		Котел по рівню		Регулятор тиску				Регулятор рівня			
		k_1 (блок Gain)	k (блок Tr Fcn 2)	T_{ap} (блок Gain 4)	k_2 (блок Tr Fcn 4)	k_m (блок Tr Fcn 1)	T_m (блок Tr Fcn 1)	k_3 (блок Gain 3)	k_4 (блок Gain 2)	k_5 (блок Gain 1)	T_c (блок Tr Fcn 3)	k (блок Tr Fcn 3)	
1	1	1	1	$\pm 50; \pm 100; \pm 250; \pm 500$	0,15	-5; -10; -20	20	-1	1	-300	10 20; 30	0,5; 1; 2	
2	1	1	1	$\pm 50; \pm 100; \pm 250; \pm 500$	0,2	-5; -10; -20	20	-1	2	-400	10 20; 30	0,5; 1; 2	
3	1	1	1	$\pm 50; \pm 100; \pm 250; \pm 500$	0,25	-5; -10; -20	20	-1	2,5	-350	10 20; 30	0,5; 1; 2	
4	1	1	1	$\pm 50; \pm 100; \pm 250; \pm 500$	0,3	-5; -10; -20	20	-1	2	-400	10 20; 30	0,5; 1; 2	
5	1	1	1	$\pm 50; \pm 100; \pm 250; \pm 500$	0,22	-5; -10; -20	20	-1	1,5	-300	10 20; 30	10 20; 30	

налагодження регулятора рівня k , T_c (блок Transfer Fcn 3), що забезпечують перехідний процес з найкращими показниками якості.

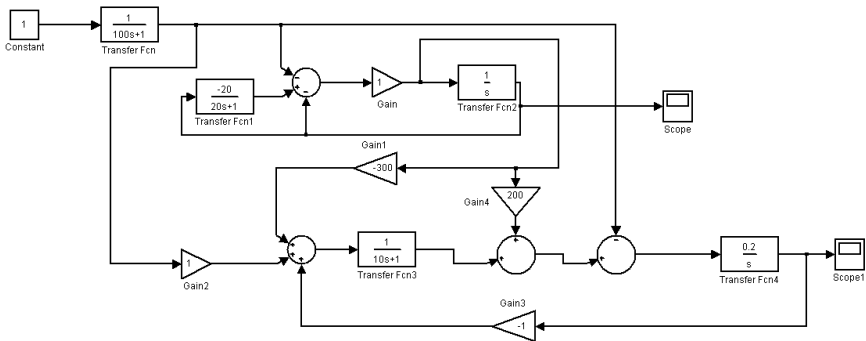


Рис.3.4. Структурна схема САР тиску і рівня з додатковим імпульсом по швидкості зміни тиску в котлі для набору у Simulink

7. Перевірити вплив на роботу САР похідної $d\delta P/dt$, для чого отримати у Simulink перехідні функції δH (блок Scope 1) при фіксованих параметрах налагодження регулятора тиску k_m , T_m (блок Transfer Fcn 1) та рівня k , T_c (блок Transfer Fcn 3), визначених згідно п. 4, 6 та змінному T_{ap} (блок Gain 4).

Обробка результатів дослідження

1. За графіками визначити показники якості перехідних процесів: перерегулювання σ , час регулювання t_p , статичну помилку δ .
2. Побудувати функціональні залежності показників якості від значень коефіцієнтів k_m , k , T_c та T_{ap} .
3. Проаналізувати отримані результати і визначити значення коефіцієнтів k_m , T_m , k , T_c та T_{ap} , що забезпечують перехідні процеси з кращими показниками якості.
4. Зробити висновки про вплив параметрів налагодження на показники якості САР.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Принципову і функціональну схеми САР.
2. Схему моделювання САР у Simulink.

3. Рівняння елементів у САР.
4. Отримані криві перехідних процесів і результати їхньої обробки (функціональні залежності показників якості від значень коефіцієнтів).
5. Висновки щодо роботи.

Питання для самоперевірки та захисту

1. Робота САР тиску пари.
2. Робота САР рівня води в барабані котла.
3. Що таке автоматичний регулятор?
4. Виконати класифікацію САР тиску.
5. Дати визначення і навести засоби знаходження показників якості.
6. Виконати класифікацію САР рівня.
7. Проаналізувати отримані результати дослідження.

Лабораторна робота № 4. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ В ГОЛОВНОМУ КОНДЕНСАТОРІ

Мета роботи: 1) вивчення системи автоматичного регулювання рівня у головному конденсаторі; 2) дослідження впливу параметрів налагодження регулятора на показники якості САР.

1. Опис роботи системи. Принципова схема системи зображена на рис. 4.1. Мембранний датчик рівня 3 сприймає перепад тисків від

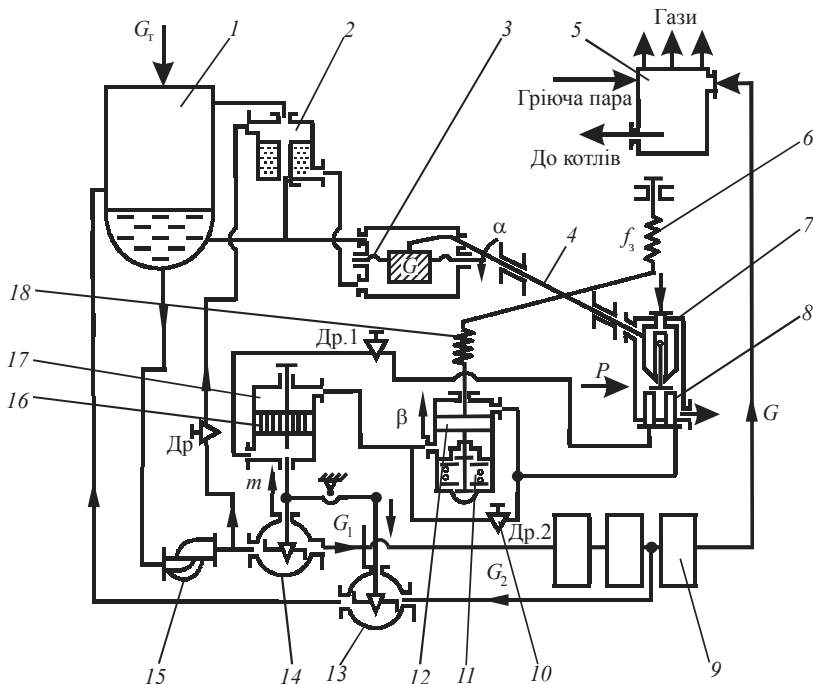


Рис. 4.1. Принципова схема системи автоматичного регулювання рівня в головному конденсаторі

1 – головний конденсатор (об'єкт регулювання); 2 – порівняльна (конденсаційна) посудина; 3 – мембрана (чутливий елемент датчика рівня); 4 – важіль; 5 – деаератор; 6 – задавальна пружина; 7 – струминний підсилювач; 8 – реле підсилювача; 9 – теплообмінні апарати; 10 – дросель пристрою зворотного зв'язку; 11 – пристрій гнучкого (ізодромного) зворотного зв'язку; 12 – поршень пристрою зворотного зв'язку; 13 – клапан рециркуляції; 14 – дросельний клапан; 15 – конденсатний насос; 16 – поршень сервомотора; 17 – сервомотор; 18 – пружина зворотного зв'язку

змінного стовпа води в збірнику конденсату 1 і стовпа в порівнювальній посудині 2, куди для забезпечення сталості його рівня підведена від конденсатного насосу спеціальна підживлювальна трубка. При відхиленні рівня в конденсаторі важіль вимірювального органа (датчика рівня) повертає заслінку струминного гідравлічного підсилювача 7. У результаті змінюється перепад тисків на соплах реле 8, поршень сервомотора починає рухатися й переміщує шток дросельного клапана 14 та клапана рециркуляції 13, які управляють відводом конденсату зі збірника, і відновлює значення регульованої величини – рівня конденсату в головному конденсаторі 1. Поршень 12 ізодрома при цьому також переміщується, здійснюючи гнучкий зворотний зв'язок. Змінювати сталу часу сервомотора 17 можна за допомогою дросельного клапана Др.1, а постійну часу ізодрома – за допомогою клапана Др.2.

2. Математичний опис окремих елементів САР. Рівняння всіх елементів системи, записані у відносних відхиленнях:

рівняння вимірювального пристрою (див. рис. 4.1), що включає чутливий елемент (мембрана 3 датчика рівня), важільну систему 4, пружину 6, що задає й пружину 18 зворотного зв'язку:

$$\alpha = k_3 f_3 - k_B H - k_{33} z,$$

де α – кут повороту важеля; k_3 – коефіцієнт передачі пристрою, що задає; f_3 – зміна дії, що задає; k_B – коефіцієнт передачі вимірювального пристрою; H – зміна рівня в головному конденсаторі; z – переміщення поршня ізодрому; k_{33} – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку (ізодрому);
рівняння гідравлічного підсилювача 7:

$$P = k_{\Pi} \alpha,$$

де P – перепад тисків води в прийомних соплах гідравлічного підсилювача; k_{Π} – коефіцієнт передачі підсилювача;
рівняння виконавчого елемента (сервомотора) 17:

$$T_c \frac{dm}{dt} = P,$$

або

$$\frac{dm}{dt} = k_c P,$$

де T_c, k_c – постійна часу та коефіцієнт передачі сервомотора; m – хід поршня 16 сервомотора;
рівняння ізодрому 11:

$$T_i \frac{dz}{dt} + z = \beta T_i \frac{dm}{dt},$$

або

$$T_i \frac{dz}{dt} + z = k_{33} \frac{dm}{dt},$$

де T_i – стала часу ізодрому; β – коефіцієнт, який дорівнює відношенню об'єму, що описує поршень сервомотора при переміщенні з одного крайнього положення в інше до відповідного об'єму ізодрому; $k_{33} = \beta T_i$ – коефіцієнт передачі пристрою гнучкого зворотного зв'язку.

рівняння регулювального органа – клапанів, за допомогою яких регулюється відвід води з конденсатора. Дросельний клапан 14 і клапан рециркуляції 13 профілюються таким чином, щоб їхня спільна характеристика була лінійною:

$$G = G_1 - G_2 = m,$$

де G – витрата конденсату на деаератор; G_1 й G_2 – відповідно витрата конденсату через дросельний клапан 14 і клапан рециркуляції 13;

рівняння об'єкта регулювання – збірника конденсату головного конденсатора 1:

$$T_k \frac{dH}{dt} = G_T - G,$$

або

$$\frac{dH}{dt} = k_k (G_T - G),$$

де T_k, k_k – постійна часу та коефіцієнт передачі конденсатора; G_T – витрата пари на головний конденсатор.

Функціональна та структурна схеми системи автоматичного регулювання рівня в головному конденсаторі приведені на рис. 4.2 та 4.3 відпо-

відно. Від'ємна дія G із входу об'єкта регулювання перенесена на вхід елемента порівняння в головному зворотному зв'язку.

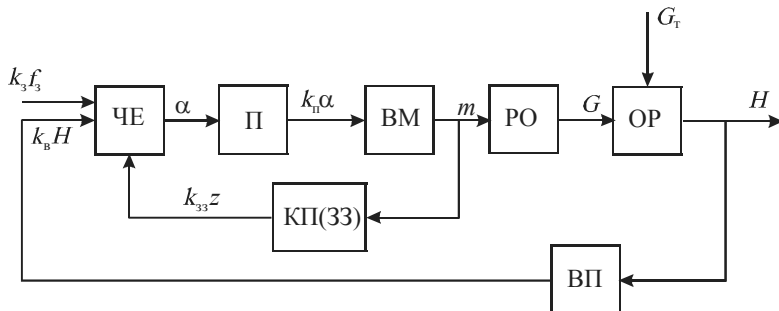


Рис. 4.2. Функціональна схема системи автоматичного регулювання рівня в головному конденсаторі:

ЧЕ – чутливий елемент; П – підсилювач; ВМ – виконавчий механізм(сервомотор); РО – регулюючий орган (дрозельний і рециркуляційний клапани); ОР – об'єкт регулювання; ВП – вимірвальний пристрій; КП – корегуючий пристрій (ізодром, вбудований в зворотній зв'язок)

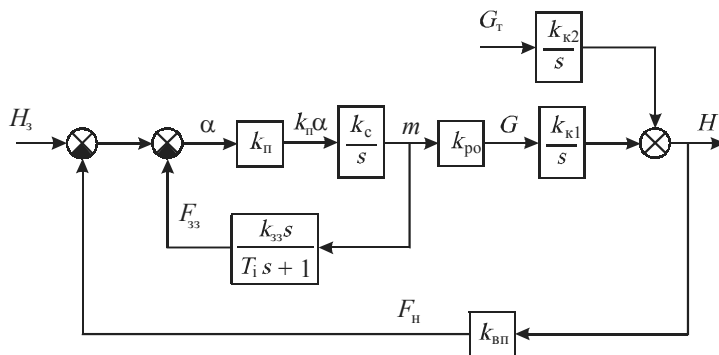


Рис. 4.3. Структурна схема системи автоматичного регулювання рівня в головному конденсаторі

Чисельні значення постійних коефіцієнтів наведено в табл. 4.1.

Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Simulink.
2. Провести моделювання САР згідно до схеми на рис. 4.4 і чисельних значень у табл. 4.1. (варіант задається викладачем).

Таблиця 4.1

Варіант	Коефіцієнти									
	f_3 (блок Constant)	$k_{нп}$ (блок Gain)	k_c (блок Tr. Fcn 1)	$k_{р0}$ (блок Gain 1)	k_k (блоки Tr. Fcn 2, 3)	G_r (блок Constant 1)	T_1 (блок Tr. Fcn)	$k_{зз}$ (блок Tr. Fcn)	$k_{нп}$ (блок Gain 2)	
1	0	2	0,5; 1; 1,5	2	0,1	1	0,5; 2; 5	0,1; 1; 2	1	
2	0	2	0,5; 1; 1,5	2	0,1	1,5	0,6; 2,5; 5	0,1; 1,5; 2	1	
3	0	2	0,5; 1; 1,5	2	0,1	2	0,8; 3; 5	0,1; 1,5; 3	1	
4	0	2	0,5; 1; 1,5	2	0,1	2,5	0,7; 1,5; 4	0,1; 0,8; 2	1	
5	0	2	0,5; 1; 1,5	2	0,1	2	0,6; 1,8; 3,5	0,1; 1; 2	1	

3. У Simulink одержати перехідну функцію САР при подачі на вхід дії, що збурює шляхом зміни G_r при постійному значенні впливу, що задає ($H_3 = 0$). Всі координати будуть в відхиленнях від усталеного режиму при заданому значенні рівня.

4. Отримати перехідні процеси при зміні параметрів сервомотора k_c (блок Transfer Fcn 1) та ізодромного зворотного зв'язку T_1 , $k_{зз}$ (блок Transfer Fcn).

Обробка результатів дослідження

1. За графіками перехідних процесів, що отримані згідно до п.п. 3.4 порядку виконання роботи, визначити показники якості отриманих перехідних процесів: перерегулювання σ , час регулювання t_p , статичну помилку δ .

2. Побудувати функціональні залежності показників якості від параметрів сервомотора k_c та ізодромного зворотного зв'язку T_1 , $k_{зз}$.

3. Проаналізувати отримані в п. 2. результати і визначити перехідні процеси з найкращими і найгіршими показниками якості.

4. Зробити висновки про вплив параметрів налагодження регулятора на показники якості САР.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Принципову, функціональну й структурну схеми САР, схему набору САР на ПК.

2. Математичний опис всіх елементів системи.

3. Графіки перехідних процесів.

4. Результати обробки графіків.
5. Висновки по роботі.

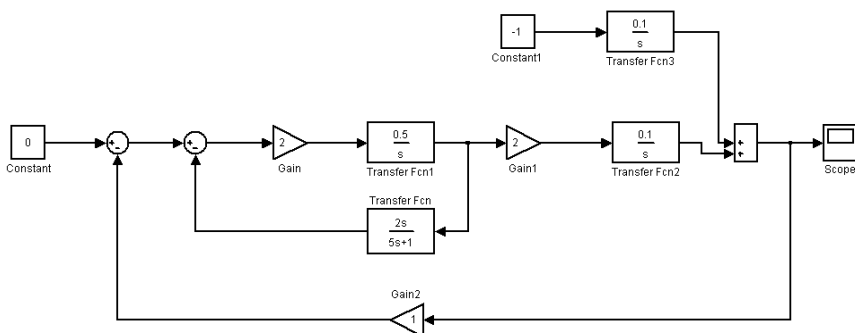


Рис. 4.4. Схема набору моделі САР рівня в головному конденсаторі в Simulink

Питання для самоперевірки та захисту

1. Робота САР згідно до принципової схеми.
2. Показати знання відповідності принципової, функціональної, структурної схем САР і схеми моделювання.
3. Принцип дії гнучкого зворотного зв'язку.
4. Закони роботи промислових регуляторів.
5. Виконати класифікацію САР, що досліджується. Використати для підтвердження вірності класифікації приведені схеми і результати досліджень.
6. Показники якості перехідних процесів.

Лабораторна робота №5. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА СУДНОВИХ КОТЛІВ

Мета роботи: 1) вивчення системи автоматичного регулювання спалення палива суднових котлів; 2) дослідження впливу параметрів налагодження регулятора на показники якості САР.

1. Опис роботи системи. Принципова схема системи наведена на рис. 5.1. Подібними системами регулювання обладнанні котли танкерів типу "Софія" і танкер "Перемога". Особливістю системи є жорсткий механічний зв'язок між органами, що задають подачу палива, лекалами (кулачками) – задатчиками 23 й 42 регуляторів тиску палива 19 і витрати повітря 43 відповідно. Цей зв'язок обумовлений розміщенням всіх пристосувань, що задають, регуляторів обох котлів на обумовлений розміщенням всіх пристосувань, що задають, регуляторів обох котлів на одному валу 24, що повертається пропорційно зміні тиску пари. На рис. 5.1 показано частину вала з регуляторами, що керують роботою одного з котлів.

Головний регулятор 10 вимірює тиск пари в головному паропроводі за допомогою сильфона 11. На важелі регулятора, до якого прикріплена регулююча заслінка водяного підсилювального реле 16, зрівнюється зусилля від тиску пари на сильфон, від натягу пружини 15, що задає, й пружини зворотного зв'язку 12, на яку впливає кулачок 13.

Порушення рівноваги сил на важелі призводить до зсуву заслінки підсилювального реле 16, що з'єднане з виконавчим сервомотором 18, який повертає вал керування за допомогою зубчатого сектора й шестерні 14. При обертанні вала кулачок зворотного зв'язку 13 змінює натяг пружини, відновлюючи рівновагу на важелі регулятора 10. Тому кожній зміні тиску пари відповідає заздалегідь певний кут повороту вала 24.

На валу укріплено кулачок 42 регулятора 43, що задає витрату повітря. Головним зворотним зв'язком є перепад тиску в топці котла, що вимірюється диференційною мембраною 44 датчика 45 цього регулятора.

Регулятори витрати повітря керують сервомоторами 1 повітререгулюючих заслінок, що розташовані на усмоктуванні котлових вентиляторів 2. Шток сервомотора із заслінками з'єднаний через роз'єднувальну гідравлічну муфту, за допомогою якої він може бути відокремлений від заслінок для полегшення ручного керування (на малюнку муфта не показана).

Тиск палива перед форсунками 3 встановлюється регулятором 19, що керує через ізодром 25 сервомотором 27 зливного клапана 28. Програма зміни тиску палива перед форсунками залежно від навантаження котла визначається профілем кулачка 23, який змінює натяг пружини, що

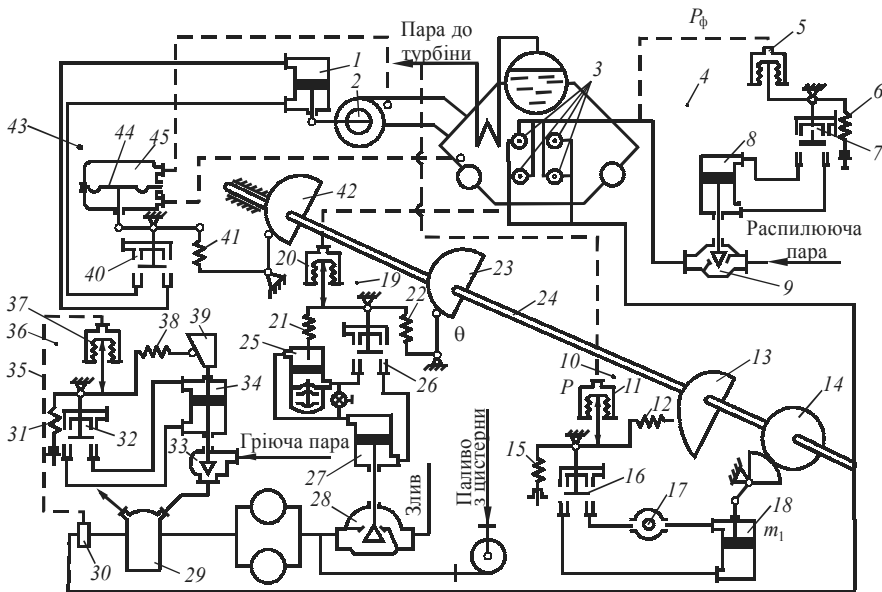


Рис. 5.1 Принципова схема системи автоматичного регулювання паливоспалювання суднових котлів:

1 – сервомотор; 2 – вентилятор; 3 – форсунки; 4 – регулятор тиску пари для розпилювання палива; 5 – вимірювач тиску пари; 6 – пружина, що задає тиск пари; 7 – струминний підсилювач; 8 – виконавчий механізм (сервомотор); 9 – регулюючий орган (дросельний кран); 10 – регулятор тиску пари на виході котла (головний регулятор); 11 – вимірювач тиску; 12 – пружина зворотного зв'язку; 13 – кулачок; 14 – шестерня; 15 – пружина, що задає тиск пари; 16 – струминний підсилювач; 17 – дросельний клапан; 18 – виконавчий сервомеханізм; 19 – регулятор тиску палива; 20 – вимірювач тиску палива; 21 – пружина зворотного зв'язку; 22 – пружина, що задає тиск палива; 23 – кулачок; 24 – вал; 25 – пристрій ізодрому; 26 – струминний підсилювач; 27 – сервомеханізм; 28 – регулюючий орган (дросельний клапан для зливу палива); 29 – підігрівач палива; 30 – вимірювач температури (датчик температури – термобалон); 31 – пружина, що задає температуру палива; 32 – струминний підсилювач; 33 – регулюючий орган; 34 – сервомеханізм; 35 – капіляр; 36 – регулятор температури палива; 37 – сильфон в пристрої вимірювання температури палива; 38 – пружина зворотного зв'язку; 39 – лекало; 40 – струминний підсилювач; 41 – пружина, що задає витрату повітря; 42 – лекало; 43 – регулятор витрати повітря; 44 – мембрана; 45 – датчик для вимірювання витрати повітря

задає 22 регулятора тиску 19. Головним зворотним зв'язком є тиск палива перед форсунками, що вимірюється сильфоном 20 регулятора.

Температура палива регулюється автономним регулятором 36, що керує сервомотором 34 клапана 33 пари, що гріє, підігрівника палива 29.

Таким чином, при повертанні головного вала 24 одночасно змінюється тиск палива перед форсунками 3 і витрата повітря в топці котла. Але, якщо подача палива до форсунок змінюється при цьому практично миттєво, то подача повітря відбувається із запізненням, що викликане інерційністю сервомотора 1 і повітряного тракту між вентиляторами і топкою котла. У результаті, при маневрі на збільшення навантаження котла може виникнути тимчасова нестача повітря й задимлення. Щоб зменшити неузгодженість подачі палива й повітря при збільшенні навантаження, між підсилювальним реле головного регулятора 10 і сервомотором 18 включено дросельний клапан 17 з кулькою, що знижує швидкість переміщення сервомотора й вала при обертанні у бік, що відповідає збільшенню паливоподачі. Час переміщення сервомотора 18 при маневрі на зниження навантаження звичайно становить 15 с, а при маневрі на збільшення – 25...30 с.

Тиск пари, що подається до паро-механічних форсунок 3 для покращення розпилю палива, підтримується постійним на всіх навантаженнях котла за допомогою регулятора 4, що керує сервомотором 8 дросельного парового клапана 9.

Система регулювання спалювання палива включає ряд допоміжних і захисних пристроїв, що не показані на малюнку.

На валу пульта керування 24 розміщені кулачки, що роблять переключення швидкостей електроприводів котлових вентиляторів і паливних насосів відповідно до рівня навантаження котлів.

На перемичках трубопроводів робочої води сервомоторів встановленні обхідні крани, що з'єднують між собою обидві порожнини сервомотора у випадку переходу на ручне керування, а також дросельні клапани, призначенні для зміни швидкодії сервомоторів.

Робоча вода(конденсат) до підсилювального реле регулятора подається через фільтри одним із двох електроприводних насосів. Зливальні магістралі води від підсилювальних реле з'єднані із цистерною дистилляту.

2. Математичний опис окремих елементів САР. Функціональні схеми САР паливоспалювання парового котла наведені на рис. 5.2.

Рівняння всіх елементів системи, записані у відносних відхиленнях: рівняння вимірювального пристрою та елемента порівняння

$$\alpha = -k_v P - k_{33} m + k_3 q,$$

де α – кут повороту важільної системи; P – зміна тиску в датчику (сильфоні або мембранному датчику); m – переміщення поршня сервомотора; q – зміна впливу, що задає; k_v, k_{33}, k_{33} – постійні коефіцієнти.

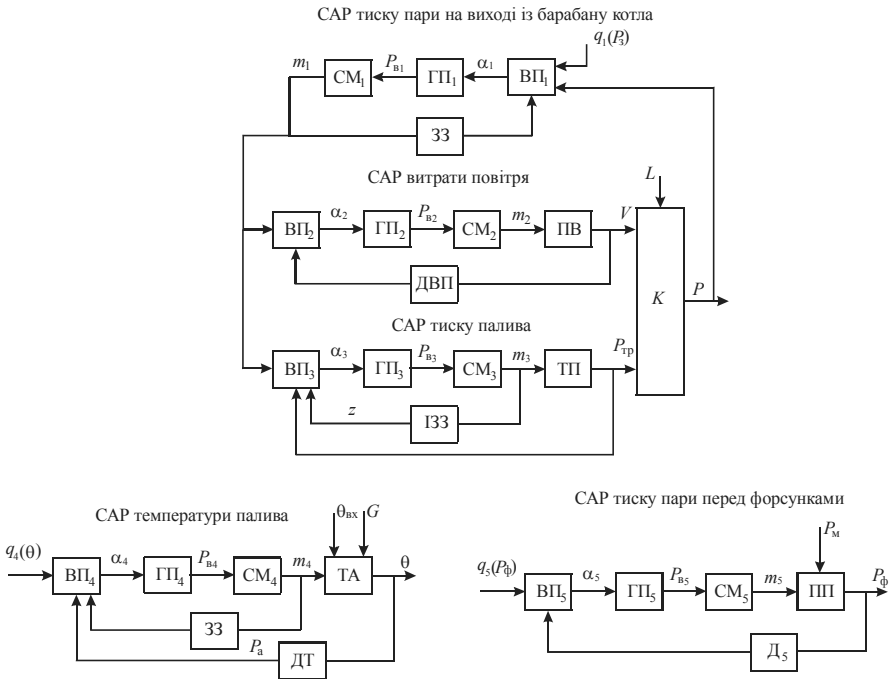


Рис. 5.2. Функціональна схема САР паливоспалення парового котла:

ВП – вимірювальний пристрій з елементом порівняння; ГП – гідравлічний підсилювач; ДВП – датчик витрати повітря; ДТ – датчик температури (ампула – термобалон); ІЗЗ – ізодромний пристрій зворотного зв'язку; К – котел; ПП – паропровід; ПВ – повітрявид; СМ – сервомотор; ТА – теплообмінний апарат; ТП – трубопровід палива

Якщо у вимірювальному пристрої немає пружини зворотного зв'язку (системи 5 і 14 на рис. 5.1), то $k_{33} = 0$;
рівняння гідравлічного підсилювача

$$P_B = k_{\Pi} \alpha,$$

де P_B – перепад тиску вода в прийомних соплах гідравлічного підсилювача; k_{Π} – коефіцієнт передачі гідравлічного підсилювача;
рівняння сервомотора(сервомеханізму, серводвигуна)

$$T_c (dm/dt) = P_B,$$

або,

$$\frac{dm}{dt} = k_c P_B,$$

де m – переміщення поршня сервомотора; $k_c = 1/T_c$ – коефіцієнт передачі сервомотора; T_c – постійна часу сервомотора; рівняння ізодрому

$$T_i \frac{dz}{dt} + z = \beta T_i \frac{dm}{dt},$$

де T_i – постійна часу ізодрому; z – переміщення поршня ізодрому приведене до пружини зворотного зв'язку; β – постійний коефіцієнт; рівняння датчика температури (системи 3б)

$$T_a \frac{dP_a}{dt} + P_a = k_a \Theta,$$

де T_a – постійна часу датчика температури; P_a – тиск у сільфоні і ампулі манометричного датчика температури; Θ – величина зміни температури палива;

рівняння котла як об'єкта регулювання тиску пари

$$T_k \frac{dP}{dt} + P = P_{тр} - L + kV,$$

де P – тиск у барабані котла; $P_{тр}$ – тиск палива перед форсунками; L – навантаження котла (витрата пари); V – витрати повітря на котел; k – постійний коефіцієнт;

рівняння повітревоводу котла

$$T_1 \frac{dV}{dt} + V = k_1 m_2,$$

де m_2 – переміщення поршня сервомотора системи регулювання витрати повітря на котел; T_1 – постійна часу; k_1 – постійний коефіцієнт;

рівняння динаміки паливного трубопроводу

$$P_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} m_3,$$

де $k_{\text{тр}}$ – коефіцієнт передачі паливного трубопроводу; m_3 – переміщення поршня сервомотора;

рівняння динаміки теплообмінного апарата системи регулювання температури палива

$$T_{\Theta} \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = k_{\Theta} m_4 - k_4 m_1 + \Theta_{\text{вх}},$$

де Θ – температура палива; m_4 – переміщення сервомотора, що керує клапаном подачі пари в теплообмінник; $G = k_4 m_1$ – витрата палива через теплообмінник; $\Theta_{\text{вх}}$ – температура пари, що подається на вхід теплообмінного апарату;

рівняння динаміки паропроводу подачі пари до форсунок котла:

$$T_{\text{пп}} \frac{dP_{\Phi}}{dt} + P_{\Phi} = k_{\text{пп}} m_5 + P_{\text{м}},$$

де P_{Φ} – тиск пари в магістралі подачі пари до форсунок котла; m_5 – переміщення поршня сервомотора, що змінює витрату пари в магістраль; $P_{\text{м}}$ – тиск пари в магістралі, що живить паропровід. ($P_{\text{м}} = k_5 P$).

Структурна схема САР паливоспалювання парового котла приведена на рис. 5.3. На структурній схемі індекси відповідають номеру відповідної системи, що зображена на рисунку.

Схеми набору моделей САР паливоспалювання в Simulink приведена на рис. 5.4. В схемі набору гідравлічні підсилювачі показані. Сервопривод, як один елемент, включає в свій склад гідропідсилювач і серводвигун (сервомеханізм).

Чисельні значення постійних коефіцієнтів наведені в табл. 5.1, 5.2.

Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Simulink.
2. Провести моделювання САР в Simulink одного або трьох зв'язаних між собою контурів (за завданням викладача).

САР тиску пари на виході із барабану котла

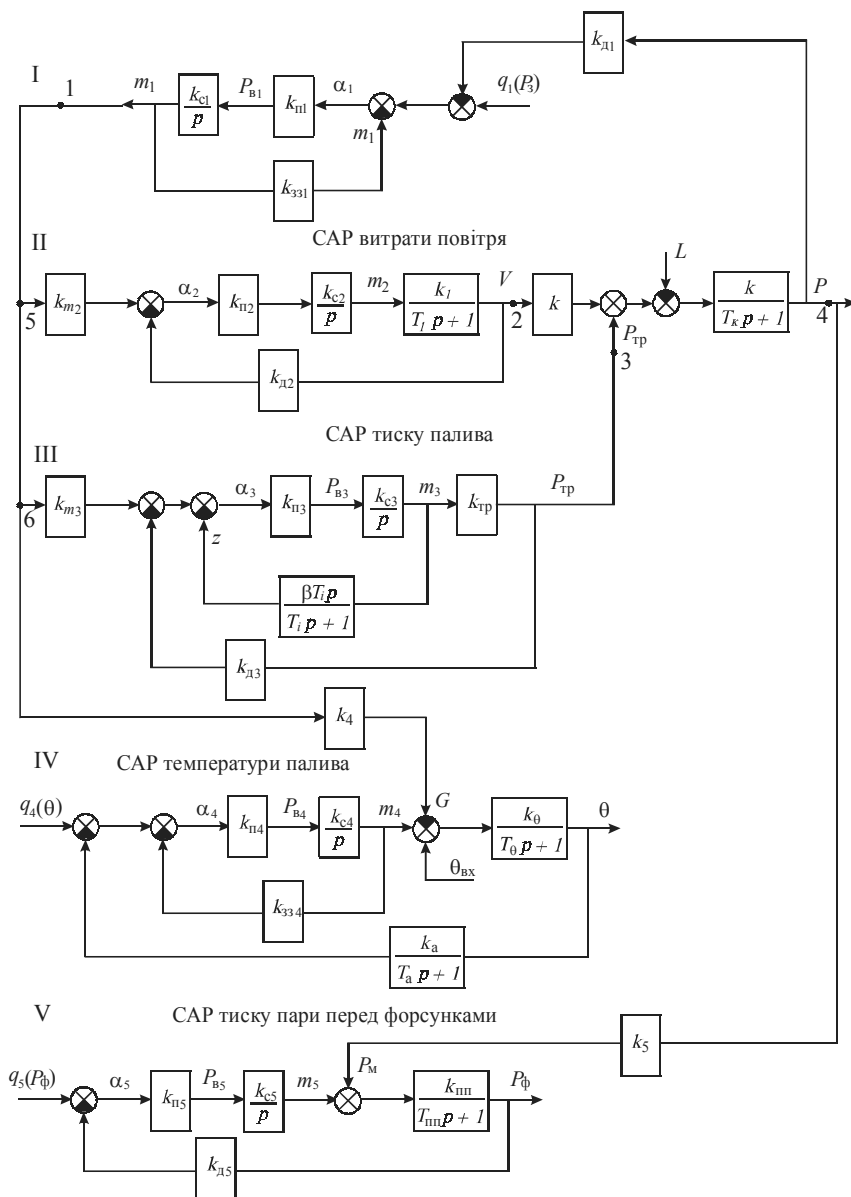


Рис. 5.3. Структурна схема САР паливоспалення парового котла

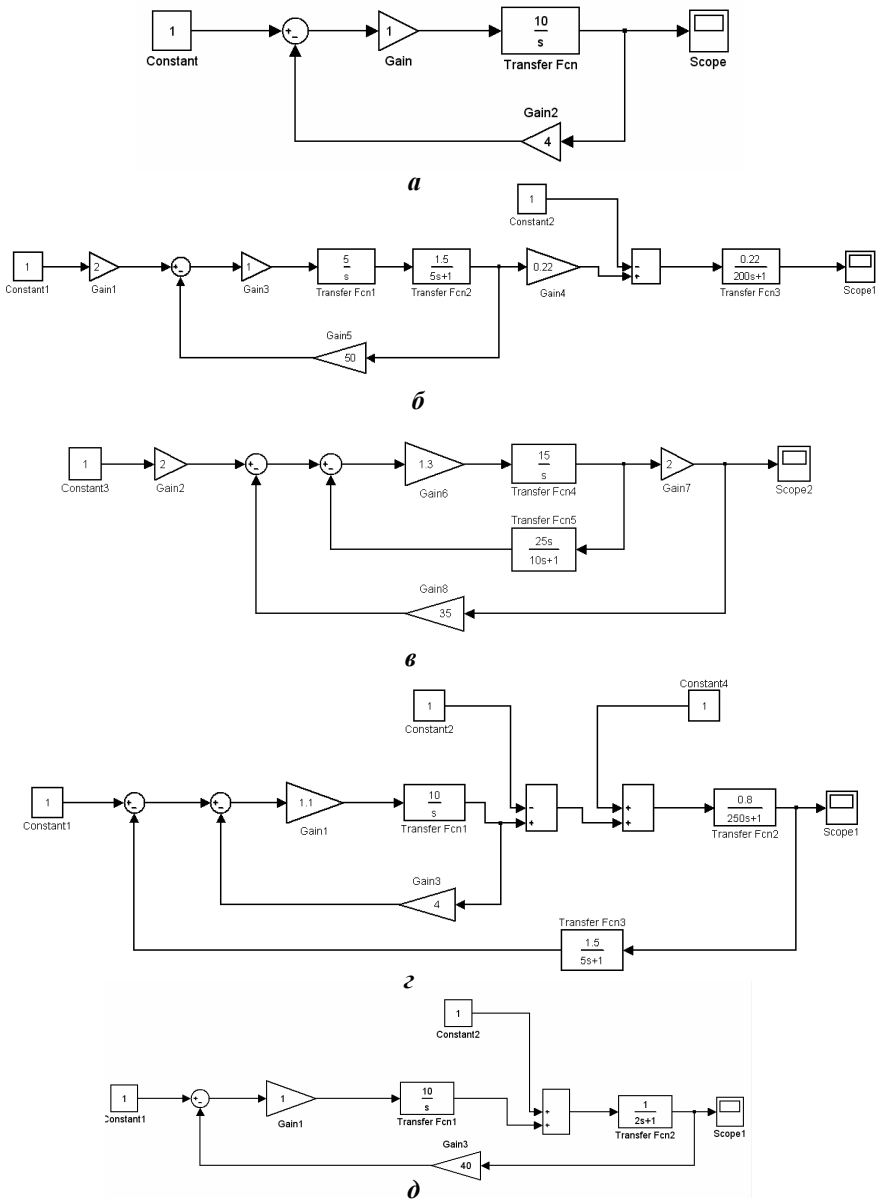


Рис. 5.4. Схема набору САР паливоспалення парового котла у Simulink
a – САР тиску пари на виході з барабану котла; **б** – САР витрати повітря; **в** – САР тиску палива; **г** – САР температури палива; **д** – САР тиску пари перед форсунками

Таблиця 5.1

Регульована величина	Тиск пари в барабані		Тиск палива		Витрата повітря		Температура палива		Тиск пари перед форсунками			
	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б		
Варіанти												
k_d	50	40	30	25	35	30	45	50	55	30	40	35
$k_{зз}$	4	4	4	4	4	4	0	0	0	3	4	0
k_3	30	30	30	20	20	20	40	40	40	50	40	20
$k_{п}$	1	1	1	1,3	1,3	1,3	1	1	1	1,1	1,2	1
k_c	10	20	30	15	20	25	5	8	10	10	14	10
k_m	-	-	-	2	2	2	2	2	2	-	-	-

Таблиця 5.2

Варіанти	Об'єкт регулювання										Ізодром		Датчик температури		
	котел		ПВ		ТІ		ТА		ПП		коefficientи				
T_k	k_n	T_1	k_1	$k_{тр}$	T_{θ}	k_{θ}	T_{inn}	k_{inn}	β	T_i	k_a	T_a			
а	200	0,22	5	1,4	2	250	0,8	2	1	2,5	10	1,5	5		
б	180	0,24	8	1,6	2	150	0,7	3	1	3,0	8	1,8	4		
в	220	0,26	10	1,8	2	200	0,9	4	1	3,5	6	2,0	3		

3. При дослідженні трьохконтурної САР почергово перевірити якість роботи першого контуру. Для цього:

а) відключити контур I в т. 1 від контурів II, III (див. рис. 5.3) і одержати перехідну функцію $m_1(t)$ при збуренні $q_1 = 1, L = 0$. Якщо потрібно покращити якість перехідного процесу – змінити параметри зворотного зв'язку (k_{331}).

б) підключити в т. 1 m_1 до контуру II і відключити контур III в т. 2 і 3.

4. Перевірити роботу контурів I, II. Для цього одержати перехідну функцію $V(t)$ при зміні q_1 . Для покращення роботи САР змінювати $k_{д2}$.

5. Перевірити роботу контуру III. Для цього відключити контури I та II у т. 3 і 6 відповідно, та отримати перехідну функцію $P_{тр}(t)$. Для покращення перехідної функції контуру III змінювати βT_1 .

6. Підключити контури I, II, III і одержати перехідну функцію $P(t)$ для $L = 1, q_1 = 0$. Для покращення роботи трьохконтурної САР змінювати $k_{331}, k_{д3}$.

7. Одержати показники якості перехідного процесу трьохконтурної САР.

8. Виконати дослідження якості роботи одноконтурної САР (температури палива або тиску пари (по завданню викладача)) при різних значеннях $k_{334}, k_{д5}$. Для цього при окремому дослідженні систем IV, V відключить сигнали m_1 і P в т. 4, 5, 6 та почергово подати дію, що збурює $q_1 = 1$, як уже було приведено вище.

9. Одержати перехідні процеси $\Theta(t)$ та $P_{\phi}(t)$ при зміні $q_4 = 1; q_5 = 1$.

10. Скласти систему в повному складі (при цьому встановити кращі параметри регуляторів, що були одержані для процесів $P(t), \Theta(t), P_{\phi}(t)$ при стрибкоподібній зміні $L = 1$, а $q_1 = q_4 = q_5 = 0$).

11. Одержати показники якості перехідних процесів.

12. Проаналізувати одержані результати і зробити висновки.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

- 1 Принципову, функціональну, структурну схеми і схему моделювання.
- 2 Математичний опис всіх елементів системи.
- 3 Порядок виконання роботи.
- 4 Графіки перехідних процесів.
- 5 Показники якості процесу регулювання і висновки.

Питання для самоперевірки та захисту

1. Принцип дії трьохконтурної САР паливоспалювання по принциповій схемі.
2. Принципи дії САР температури палива .
3. Принцип дії САР тиску пари перед форсунками.
4. Показати на принциповій схемі елементи, що відповідають зображенням елементам на функціональній схемі.
5. Порядок виконання лабораторної роботи.
6. Проаналізувати результати, що одержані в роботі.
7. Пояснити залежність якості роботи САР від виду місцевого зворотного зв'язку (жорсткий, гнучкий зворотний зв'язок, або нема місцевого зворотного зв'язку).

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Автоматизация процессов в судовой энергетике / *И.Г. Беляев, Н.Г. Курзенков, В.И. Седых, В.Н. Слесаренко*. Учебник для вузов. – Владивосток, 1999. – 405 с.

2. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления – СПб.: Профессия, 2003 – 752 с.

3. *Нелетин Р.А.* Автоматическое управление судовыми энергетическими установками. Учебник. – Л.: Судостроение, 1986. – 296 с.

4. *Тимофеев Ю.К.* Системы управления судовыми энергетическими процессами. – С.Пб: Судостроение, 1994. – 312 с.

5. *Толишин В.И., Сизых В.А.* Автоматизация судовых энергетических установок: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Консульт, 2003. – 304 с.

6. *Хлопенко М.Я., Бровинська Н.М., Шарейко Д.Ю.* Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу "Теорія автоматичного керування". – Ч. 1. Аналіз і синтез лінійних систем. – Миколаїв: НУК, 2006. – 88 с.

ЗМІСТ

Вступ	3
Загальні відомості про пакет програм "MATLAB"	4
<i>Лабораторна робота № 1. Котел як об'єкт регулювання рівня в барабані</i>	9
<i>Лабораторна робота № 2. Дослідження двоімпульсного регулятора рівня води в барабані котла</i>	16
<i>Лабораторна робота № 3. Дослідження САР тиску й рівня води в барабані котла</i>	24
<i>Лабораторна робота № 4. Дослідження САР рівня в головному конденсаторі</i>	33
<i>Лабораторна робота №5. Дослідження САР спалювання палива суднових котлів</i>	39
Рекомендована література	50

**БУГРІМ Леонід Іванович
БІЛЮК Іван Сергійович**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
" Автоматичні системи керування тепловими
енергетичними системами"
Частина 1**

(українською мовою)

Комп'ютерне складання та верстання А.Й. Лихіна

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 3,1.
Тираж 100 прим. Зам. № 286.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2506 від 25.05.2006 р.