

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

**Л. І. БУГРІМ, І. С. БІЛЮК, С. О. ГАВРИЛОВ,
І. О. РАТУШНЯК, В. І. ПОДИМАКА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
"Автоматизація суднових енергетичних установок"
У двох частинах
Частина 2**

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електронне видання
комбінованого використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ • НУК • 2019

УДК 681.5:621.437(076)
М 54

Укладачі: Л. І. Бугрім, канд. техн. наук, доцент; І. С. Білюк, канд. техн. наук, доцент; С. О. Гаврилов, канд. техн. наук; І. О. Ратушняк, канд. техн. наук, доцент; В. І. Подимака, канд. техн. наук, доцент

Рецензент Б. М. Личко, канд. техн. наук, доцент

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни М 54 "Автоматизація суднових енергетичних установок". У 2 ч. Ч. 2 / Л. І. Бугрім, І. С. Білюк, С. О. Гаврилов, І. О. Ратушняк, В. І. Подимака. – Миколаїв : НУК, 2019. – 78 с.

В методичних вказівках викладена методика дослідження впливу закону роботи і параметрів налагодження автоматичних регуляторів на якість роботи систем автоматичного регулювання суднових енергетичних установок. Усі лабораторні роботи виконуються із застосуванням персонального комп'ютера та пакета програм MATLAB.

Для студентів спеціальностей 135 "Суднобудування" (освітня програма "Суднові енергетичні установки та устаткування") та 271 "Річковий та морський транспорт" (освітня програма "Експлуатація СЕУ").

УДК 681.5:621.437(076)

Навчальне видання
БУГРІМ Леонід Іванович
БІЛЮК Іван Сергійович
ГАВРИЛОВ Сергій Олексійович
РАТУШНЯК Ігор Олександрович
ПОДИМАКА Валерій Іванович

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
"Автоматизація суднових енергетичних установок"
У двох частинах
Частина 2**

Комп'ютерне верстання *А. В. Платонова*

Коректор *М. О. Паненко*

© Бугрім Л. І., Білюк І. С., Гаврилов С. О.,
Ратушняк І. О., Подимака В. І., 2019

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2019

Формат 60х84/16. Ум. друк. арк. 4,5. Об'єм даних 9427 кб.
Тираж 15 прим. Вид. № 41. Зам. № 61

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025
E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.

ВСТУП

Широке впровадження автоматизації суднових енергетичних установок на морському і річковому транспорті ставить перед інженерно-технічним персоналом, що експлуатує суднову техніку, нові завдання і пред'являє високі вимоги до кваліфікації суднових механіків.

Науково-технічний прогрес на водному транспорті проявляється в створенні нових комплексно-автоматизованих судів. Ця обставина вимагає більш високої підготовленості суднових механіків, здатних не просто експлуатувати автоматизовані об'єкти, але і підвищувати техніко-економічну ефективність роботи суднових енергетичних установок шляхом застосування практичних і теоретичних методів оптимізації процесів регулювання і керування складними об'єктами.

Сучасна комп'ютерна техніка відкриває широкі можливості при вирішенні задач аналізу та синтезу систем автоматичного регулювання.

Для виконання таких робіт необхідно оволодіти спеціалізованими прикладними програмами і добре знати можливості, принцип дії та способи реалізації автоматичних регуляторів.

Сприяння у вирішенні цих задач і призначені данні методичні вказівки.

Лабораторна робота № 1. ОЗНАЙОМЛЕННЯ З ПАКЕТОМ ПРОГРАМ MATLAB

Мета роботи: придбання навичок роботи з пакетом програм MATLAB.

1. Зміст роботи

- 1) Вивчення інструкції до пакету програм MATLAB;
- 2) Моделювання найпростішої системи автоматичного керування.

2. Загальні відомості про пакет програм MATLAB

MATLAB – це язык програмування високого рівня призначений для технічних розрахунків. Він містить обчислення, візуалізацію та програмування у простому для використання середовищі, де задачі та їх розв'язки представлено у загальній математичній формі.

Simulink, додаток програми MATLAB – це інтерактивна система 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, багатомірними системами. Simulink є достатньо самостійним інструментом MATLAB, при роботі з яким немає необхідності у знанні самого MATLAB та його інших додатків.

Для запуску Simulink необхідно попередньо запустити пакет MATLAB, основне вікно якої представлено на рис. 1.1. На цьому рисунку також показана підказка, що з'являється при наведенні миші на ярлик Simulink на панелі інструментів.

Після відкриття основного вікна MATLAB необхідно запустити Simulink, натиснувши кнопку на панелі інструментів командного вікна MATLAB (див. рис. 1.1).

Після запуску Simulink відкриється вікно оглядача розділів бібліотеки цього додатку, яке представлено на рис. 1.2.

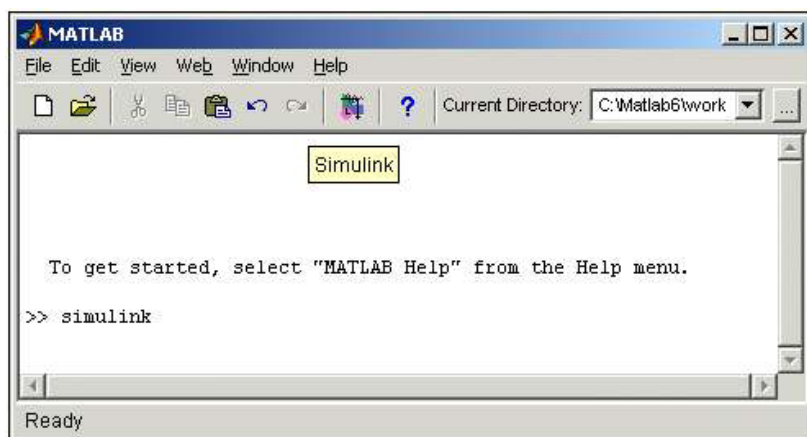


Рис. 1.1. Основне вікно програми MATLAB

На рис. 1.2 позначено: 1 – заголовок вікна з назвою програми; 2 – меню з командами File, Edit, View, Help; 3 – панель інструментів з ярликами команд, що найчастіше використовуються; 4 – вікно коментаря щодо обраного блоку; 5 – список розділів бібліотеки; 6 – вікно змісту розділу бібліотеки; 7 – підказка щодо дії, яка виконується.

Бібліотека Simulink містить наступні основні розділи: 1) Continuous – лінійні блоки; 2) Discrete – дискретні блоки;

3) Functions & Tables – функції та таблиці; 4) Math – блоки математичних операцій; 5) Nonlinear – нелінійні блоки; 6) Signals & Systems – сигнали та системи; 7) Sinks – пристрої, що реєструють; 8) Sources – джерела сигналів; 7) Subsystems – блоки підсистем.

Для створення моделі в середовищі Simulink необхідно виконати наступне:

1) Створити новий файл за допомогою команд File/New/Model на панелі інструментів. Створене вікно моделі показано на рис. 1.3.

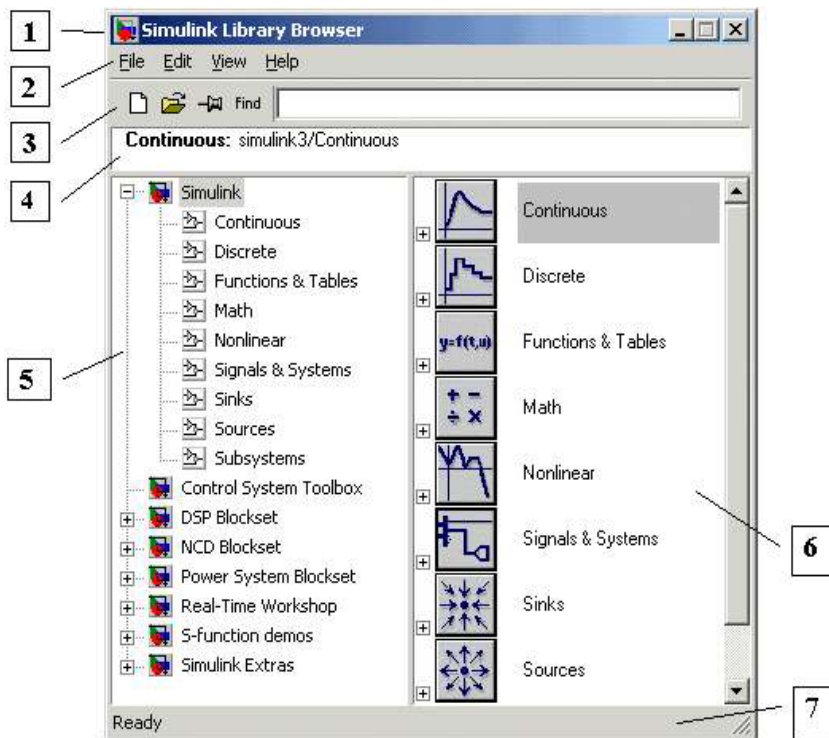


Рис. 1.2. Вікно оглядача розділів бібліотеки Simulink

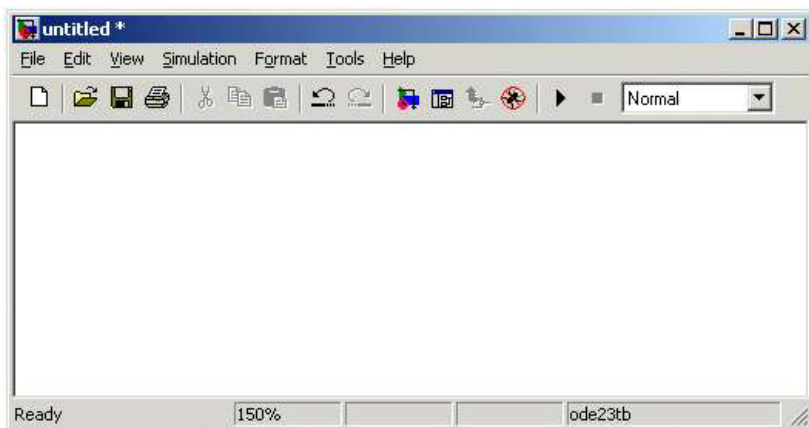


Рис. 1.3. Вікно пустої моделі Simulink

2) Розташувати блоки у вікні моделі. Для цього необхідно відкрити відповідний розділ бібліотеки (див. рис. 1.2) та, вказавши курсором на необхідний блок, перетягнути його у вікно моделі тримаючи затисненою ліву клавішу "мишки". На рис. 1.4 показано вікно моделі, що містить блоки.

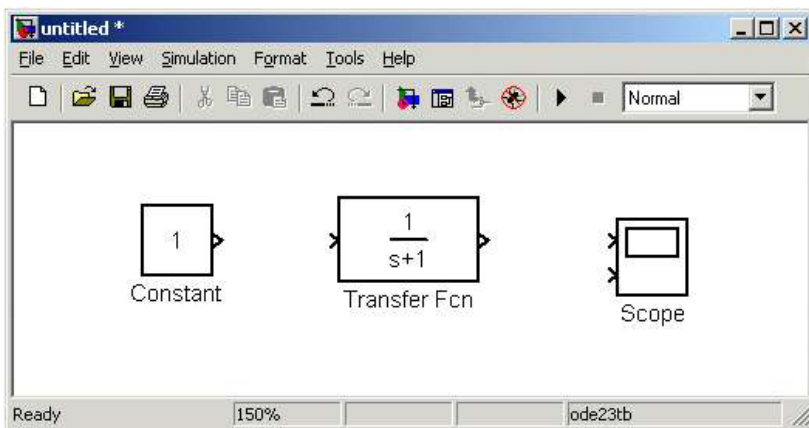


Рис. 1.4. Вікно моделі Simulink, що містить блоки

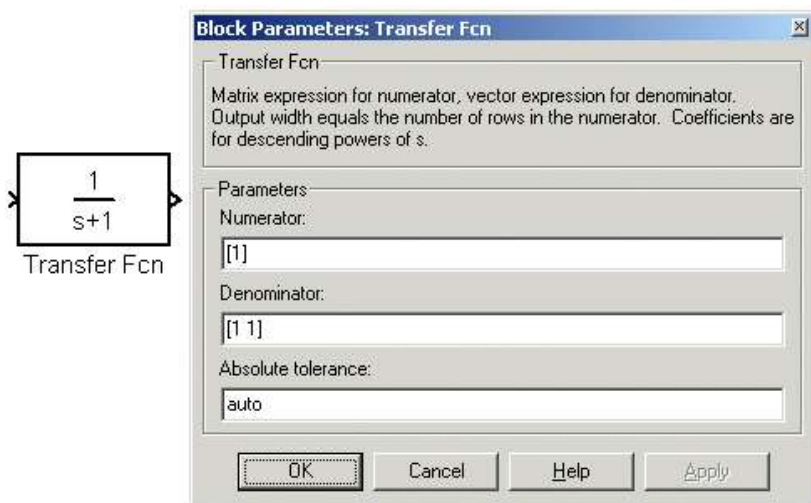


Рис. 1.5. Блок, що моделює передаточну функцію та вікно редагування параметрів цього блоку

3) Змінити параметри блоків на необхідні. Для цього необхідно два рази клацнути "мишкою" на відповідному блоці, після чого відкриється вікно редагування блоку (див. рис. 1.5).

4) Виконати з'єднання елементів схеми. Для цього необхідно вказати курсором на вихід блоку, натиснути та, не відпускаючи ліву клавішу "мишки", провести лінію до входу іншого блоку. Для створення точки розгалуження сигналу необхідно до з'єднувальної лінії підвести курсор, вказати ним вузол розгалуження сигналу, та, натиснувши праву клавішу "мишки", протягнути лінію. На рис. 1.6 представлена схема моделі зі з'єднаними блоками.

3. Порядок виконання роботи

- 1) Вивчити інструкцію до роботи з пакетом MATLAB;
- 2) Виконати моделювання системи, структурна схема якої наведена на рис. 1.7 (зворотний зв'язок – від'ємний), $x_{bx}(s)$ задається викладачем. $W(s)$ обрати з таблиці 1.1.

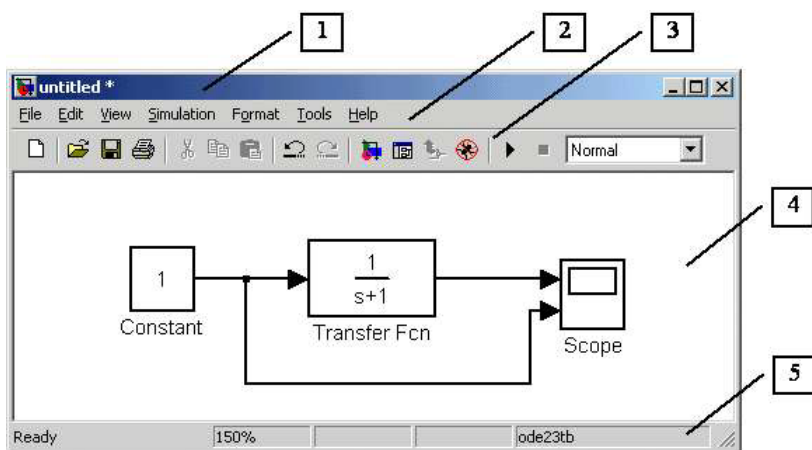


Рис. 1.6. Схема моделі зі з'єднаними блоками

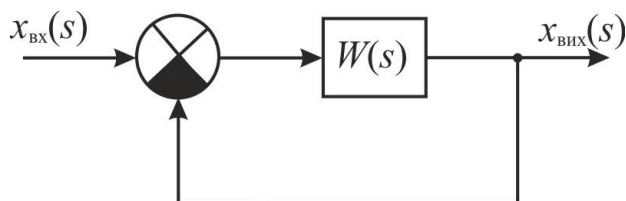


Рис. 1.7. Структурна схема системи

3) Вийти з пакету MATLAB. Роботу закінчено.

Таблиця 1.1

Варіант	1	2	3	4	5
$W(s)$	5;	10;	15;	20;	25;
	$\frac{1}{5s}$;	$\frac{2}{5s}$;	$\frac{3}{5s}$;	$\frac{4}{5s}$;	$\frac{2}{3s}$;
	$\frac{1}{5s+1}$;	$\frac{2}{5s+1}$;	$\frac{3}{5s+1}$;	$\frac{4}{5s+1}$;	$\frac{2}{3s+1}$;
	$\frac{1}{5s^2+s+1}$	$\frac{2}{5s^2+s+1}$	$\frac{3}{5s^2+s+1}$	$\frac{4}{5s^2+s+1}$	$\frac{2}{3s^2+s+1}$

4. Обробка результатів. Оформлення звіту

- 1) Назва і ціль роботи;
- 2) Структурна схема (рис. 1.7), імітаційні моделі, результати моделювання.

5. Контрольні питання

1. З якою метою застосовується пакет програм MATLAB?
2. Як здійснити запуск пакета програм MATLAB?
3. З якими видами блоків ви зустрічалися у пакеті MATLAB?
4. Перерахуйте основні та допоміжні меню пакета програм MATLAB.

Лабораторна робота № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ДВЗ ЯК ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ВАЛА

Мета роботи: вивчення практичних методів реалізації моделей об'єктів регулювання за допомогою пакета програм MATLAB.

Основні теоретичні відомості

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

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

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

В сучасній техніці часто виникає необхідність автоматичного керування об'єктами самої різної фізичної природи. До них можна віднести суднові енергетичні установки з двигунами внутрішнього згоряння, газовими і паровими турбінами; котлоагрегати, атомні реактори, антени радіолокаційних станцій, об'єкти воєнної техніки, космічні апарати і 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.

По виду динамічних характеристик більшість регульованих об'єктів можна розділити на дві групи: статичні і астатичні.

Статичні об'єкти, які іще називають стійкими або такими, що мають самовирівнювання. В таких об'єктах регульована величина при подачі на вхід збурюючої або регулюючої дії 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 регульована величина постійно змінюється і з часом встановлюється постійна швидкість зміни регульованої величини.

Вид кривої перехідного процесу $x(t)$ при подачі на вхід стрибкоподібної зміни $y(t)$ вхідної дії у малоінерційного (1), інерційного (2) та об'єкта з чистим запізнюванням (3) приведено на рис. 2.1, *а*) і *б*) відповідно.

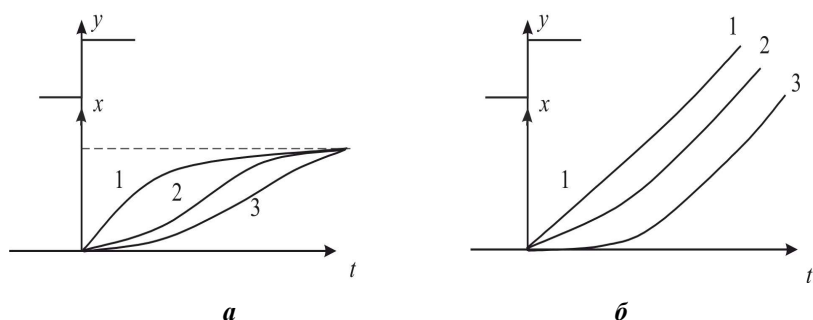


Рис. 2.1. Криві перехідного процесу статичного *а*) і астатичного *б*) регульованого об'єкта

Зустрічаються також і нестійкі регульовані об'єкти, в яких при тих же умовах регульована величина змінюється з 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 в 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 перемінної, наприклад, часу t , то перетворення по Лапласу, що виконуються над функцією $x(t)$ переводить її в функцію $x(s)$, згідно співвідношенню:

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

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

Таке перетворення скорочено позначають так: $x(s) = L\{x(t)\}$ 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, тобто для $t = 0$ і використовується в технічних задачах після подачі вхідних дій, а це якраз і має практичний інтерес при рішенні задач автоматичного регулювання.

В загальному випадку оригінал функції $x(t)$, знаходиться по зображенню шляхом зворотного перетворення Лапласа:

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

Операція зворотного перетворення позначається символом L^{-1} або $1/L$, тобто так:

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

Перетворення по Лапласу, що використовуються при розрахунках по автоматичці приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

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

Передаточною функцією елемента (системи) називається відношення зображення по Лапласу вихідної координати до зображення по Лапласу вхідної координати. Якщо позначити передаточну функцію через $W(s)$, то можна записати:

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

3. Двигун внутрішнього згоряння як об'єкт регулювання частоти обертання вала. Функціональну схему ДВЗ як об'єкта регулювання частоти обертання вала наведено на рис. 2.2.

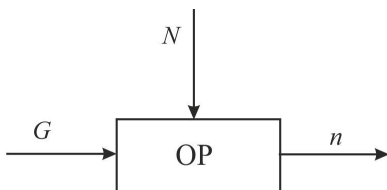


Рис. 2.2. Функціональна схема ДВЗ як об'єкта регулювання частоти обертання вала

Рівняння ДВЗ як об'єкта регулювання частоти обертання вала має вигляд:

$$T_0 \frac{dn}{dt} + n = k_h h - k_N N, \quad (1.1)$$

де T_0 – постійна часу об'єкта регулювання (ДВЗ):

k_h, k_N – коефіцієнти передачі ДВЗ по впливу, що керує та впливу, що збурює;

n, h, N – відносні відхилення від базових значень частоти обертання, ходу рейки паливного насоса, потужності споживача.

Одержимо передаточні функції для рівняння (1.1) по кожному з впливів окремо.

Згідно таблиці 1.1 можна записати:

$$T_0 s n(s) + n(s) = k_h h(s),$$

$$T_0 s n(s) + n(s) = -k_N N(s).$$

Виділимо вихідну величину $n(s)$ та винесемо її за дужки:

$$(Ts + 1)n(s) = k_h h(s),$$

$$(Ts + 1)n(s) = -k_N N(s).$$

Звідки отримаємо передаточні функції ДВЗ по впливу, що керує $h(s)$ та впливу, що збурює $N(s)$:

$$W_o^{h(s)} = \frac{n(s)}{h(s)} = \frac{k_h}{T_0 s + 1}.$$

$$W_o^{N(s)} = \frac{n(s)}{N(s)} = \frac{-k_N}{T_0 s + 1}.$$

Схему набору моделі ДВЗ як об'єкта регулювання частоти обертання вала у Simulink наведено на рис. 2.3.

Чисельні значення коефіцієнтів наведено у таблиці 2.2.

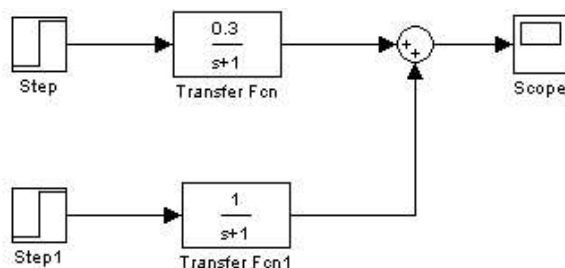


Рис. 2.3. Схема набору моделі ДВЗ як об'єкта регулювання частоти обертання вала у Simulink

Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Simulink.
2. Одержати функціональну схему ДВЗ як об'єкта регулювання частоти обертання вала згідно рівняння об'єкта.
3. Провести моделювання одновальної ДВЗ як об'єкта регулювання частоти обертання на ПК у Simulink.
4. У Simulink одержати три перехідних функції об'єкта при подачі збурюючого впливу. Для цього необхідно на вхід каналу збурюючого впливу подати імпульс N , згідно табл. 1.2. При цьому на вхід каналу керуючого впливу подати імпульс $h=0$. Коефіцієнт передачі по керуючому впливу k_h обирається з табл.1.2, відповідно до варіанта. Постійна часу об'єкта регулювання T_0 та значення коефіцієнту передачі k_N по збурюючому впливові змінюються двічі, для всіх варіантів згідно табл. 2.2.
5. Для значень коефіцієнтів вказаних викладачем одержати перехідну функцію об'єкта по керуючій дії. Для цього на вхід каналу збурюючого впливу подати імпульс $N = 0$, а на вхід каналу керуючого впливу подати імпульс $h = 1$.

Таблиця 2.2

коефіцієнти	варіанти				
	1	2	3	4	5
N	0,5	1	0,4	0,3	0,6
h	0	0	0	0	0
k_N	-0,3; -0,5	-0,3; -1	-0,5; -1	-0,3; -0,5	-0,4; -0,8
k_N	1	1	1	1	1
T_0	1; 4	2; 5	3; 6	4; 7	5; 9

Обробка результатів дослідження

1. За графіками визначити постійну часу об'єкта регулювання T_0 та коефіцієнти передачі по збурюючому та керуючому впливам.

2. Проаналізувати залежність зміни частоти обертання вала ДВЗ від значень постійної часу об'єкта регулювання T_0 та коефіцієнтів передачі по збурюючому впливу k_N та керуючому впливу k_h .

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Рівняння й передаточні функції елементів об'єкта.
2. Функціональну схему об'єкта, схему набору моделі об'єкта у Simulink.
3. Зняті криві перехідних процесів і результати їхньої обробки.
4. Висновки по роботі.

Питання для самоперевірки та захисту

1. Поняття об'єкта регулювання.
2. Розподіл об'єктів регулювання по виду динамічних характеристик.
3. Поняття динамічної характеристики. Види динамічних характеристик.

4. Фізичне розуміння постійної часу і коефіцієнта передачі в рівнянні об'єкта регулювання.

5. Залежність властивостей об'єкта від значення постійної часу.

6. Залежність властивостей об'єкта від значення коефіцієнта передачі.

7. Залежність властивостей ДВЗ як об'єкта регулювання частоти обертів вала від режимів роботи.

8. Поняття про самовирівнювання і фактор стійкості.

Лабораторна робота № 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ВАЛА ДВЗ З РЕГУЛЯТОРОМ, ЩО ПРАЦЮЄ ЗА ІНТЕГРАЛЬНИМ ЗАКОНОМ

Мета роботи: дослідження впливу параметрів налаштування регулятора на роботу системи автоматичного регулювання (САР).

1.Опис роботи САР. Система автоматичного регулювання частоти обертання вала ДВЗ (рис. 3.1) включає об'єкт регулювання – ДВЗ та автоматичний регулятор. До складу регулятора входять: чутливий елемент відцентрового датчика 1, золотниковий підсилювач 2, пружина, що задає 3, поршневий виконавчий механізм 5 і регулювальний орган 7. Задана частота обертання $n_{зд}$ встановлюється попереднім стиском пружини 3. Вхідними координатами САР є вплив, що задає $n_{зд}$ і вплив, що збурює N , який створюється навантаженням N , приєднаним до ДВЗ. Вихідна координата – регульована величина n . Дросельний кран ДР використовується для зміни швидкості переміщення поршня виконавчого механізму 5.

На сталому режимі зусилля, що розвиває пружина 3, урівноважується зусиллям з боку чутливого елемента 1, а виконавчий механізм через важільну передачу 6 і рейку 7 паливного насоса підтримують витрату палива, що подається до двигуна.

При зміні частоти обертання зазначена вище рівновага порушується і регулятор змінює витрату палива, поки не буде

відновлена задана частота обертання. Наприклад, при зменшенні n в результаті збільшення навантаження H на валу, зусилля з боку чутливого елемента 1 зменшиться, золотник переміститься нагору, поршень виконавчого механізму зміститься вниз, рейка 7 паливного насоса переміститься в бік $+$ і витрата палива збільшиться. По закінченні перехідного процесу буде встановлена витрата палива, що відповідає новому навантаженню, при якому частота обертання дорівнює заданій. Це буде тому, що усталений режим, коли виконавчий механізм не рухається, може відбутися при знаходженні золотника в положенні при якому його пояски перекривають подачу робочої рідини до виконавчого механізму, що можливо тільки при одному і тому положенні важків чутливого елемента, яке в свою чергу завжди залежить від значення обертів, а значить відповідає одному і тому (заданому) значенні обертів n .

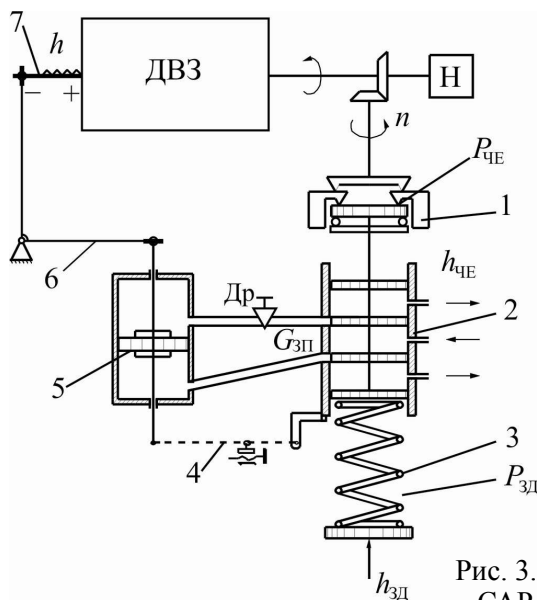


Рис. 3.1. Принципова схема САР частоти обертання вала ДВЗ

2. Математичний опис окремих елементів САР. Функціональна схема САР наведена на рис. 3.2.

У схемі прийняті позначення: ЗЕ – елемент, що задає; ЕП – елемент порівняння; ЗП – золотниковий підсилювач; ВМ – виконавчий механізм; ВП – важільна передача; ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння; ЧЕ – чутливий елемент; ПЗЗ – пристрій зворотного зв'язку; Д – диференціатор.

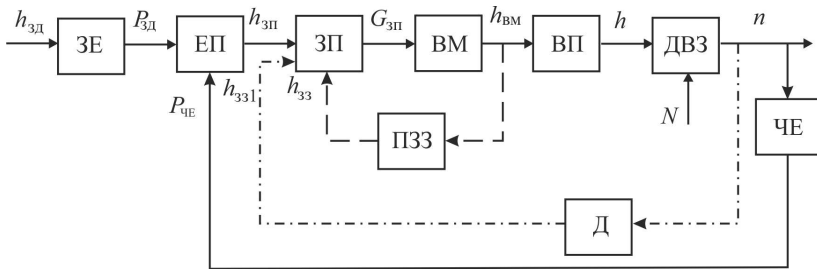


Рис. 3.2. Функціональна схема САР частоти обертання вала ДВЗ

Рівняння елементів системи, записані у відносних відхиленнях перемінних, мають вигляд:

– рівняння ДВЗ як об'єкта регулювання

$$T_0 \frac{dn}{dt} + n = k_h h - k_N N;$$

– рівняння чутливого елемента відцентрового датчика

$$P_{че} = k_{че} n;$$

– рівняння золотникового підсилювача, елемента порівняння і елемента, що задає

$$G_{зп} = k_{зп} h_{зп}, h_{зп} = P_{зе} - P_{че}, P_{зе} = k_{зе} h_{зе};$$

– рівняння виконавчого механізму і важільної передачі

$$\frac{dh_{\text{ВМ}}}{dt} = k_{\text{ВМ}} G_{\text{ЗП}}, \quad h = k_{\text{ВП}} h_{\text{ВМ}}.$$

У рівняннях прийняті позначення: T_0 – постійна часу об'єкта регулювання (ДВЗ); $k_h, k_N, k_{\text{че}}, k_{\text{зе}}, k_{\text{ЗП}}, k_{\text{ВМ}}, k_{\text{ВП}}$ – коефіцієнти передачі ДВЗ по впливу, що керує та впливу, що збурює, чутливого елемента, елемента, що задає, золотникового підсилювача, виконавчого механізму і важільної передачі; $n, h, N, h_{\text{зе}}, h_{\text{ЗП}}, G_{\text{ЗП}}, P_{\text{че}}, P_{\text{зе}}$ – відносні відхилення від базових значень частоти обертання, переміщення рейки паливного насосу, потужності споживача, зтягування пружини елемента, що задає, переміщення золотника підсилювача, витрат на виході золотникового підсилювача, зусиль, що розвивають чутливий елемент і елемент, що задає.

Структурну схему САР наведено на рис. 3.3.

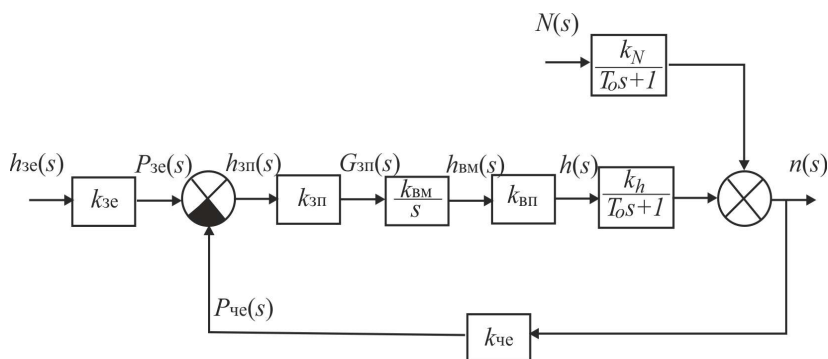


Рис. 3.3. Структурна схема САР

Чисельні значення коефіцієнтів рівнянь елементів САР і значення дії, що керує та дії, що збурює в табл. 3.1.

Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Simulink.

2. Провести моделювання САР частоти обертання вала ДВЗ з регулятором, що працює за інтегральним законом на ПК у Simulink, використовуючи значення коефіцієнтів з табл. 3.1, відповідно до варіанта, зазначеного викладачем.

3. У Simulink одержати перехідну функцію САР при подачі впливу, що збурює, і зміні параметрів настроювання регулятора. Для цього необхідно на вхід каналу впливу, що збурює, подати імпульс N , згідно табл.2.1. При цьому на вхід каналу впливу, що керує $P_{зе}$ подати імпульс $P_{зе} = 0$. Після цього задаючись значеннями коефіцієнта передачі виконавчого механізму $k_{вм}$ згідно табл. 3.1, одержати графіки перехідних функцій САР.

Таблиця 3.1

Коефіцієнти	Варіанти				
	1	2	3	4	5
T_o	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
N	1	0,9	0,8	0,7	0,6
k_N	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
$P_{зе}$	0	0	0	0	0
k_G	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$k_{вп}$	2	2	2	2	2
$k_{че}$	1	1	1	1	1
$k_{зп}$	2	2	2	2	2
$k_{вм}$	0,1; 0,5; 1	0,1; 0,5; 1	0,1; 0,5; 1	0,1; 0,5; 1	0,1; 0,5; 1

Схему набору моделі САР частоти обертання вала ДВЗ з регулятором, що працює за інтегральним законом у Simulink наведено на рис.3.4.

Обробка результатів дослідження

1. За графіками визначити наступні показники якості отриманих перехідних процесів: максимальне динамічне

відхилення A_1 ; час регулювання t_p ; відносне перерегулювання σ ; ступінь загасання коливань ψ .

2. Побудувати функціональні залежності показників якості від значень коефіцієнта передачі виконавчого механізму $k_{\text{БМ}}$.

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

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

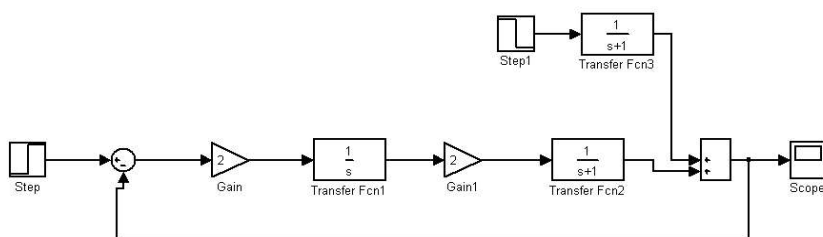


Рис. 3.4. Схема набору моделі САР частоти обертання вала ДВЗ з регулятором, що працює за I – законом у Simulink

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Принципову й функціональну схеми САР, схему набору моделі САР у Simulink.
2. Рівняння й передаточні функції елементів САР.
3. Зняті криві перехідних процесів і результати їхньої обробки: залежності показників якості від змінюваних параметрів налаштування регулятора.
4. Висновки по роботі.

Питання для самоперевірки та захисту

1. Що таке автоматичний регулятор?
2. Основні елементи автоматичного регулятора.
3. Призначення елементів автоматичного регулятора.

4. Поняття системи автоматичного регулювання (САР).
5. Види САР по класифікації.
6. Закони роботи автоматичного регулятора.
7. Залежність властивостей САР від закону роботи регулятора.
8. Поняття про статичну характеристику.
9. Статична характеристика статичної та астатичної САР.
10. Устрій та принцип дії САР з І-регулятором.
11. Класифікація САР з І-регулятором.

Лабораторна робота № 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЖОРСТОКОГО ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ЯКІСТЬ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ВАЛУ ДВЗ

Мета роботи: вивчити вплив місцевих зворотних зв'язків на математичний опис і роботу САР. Ознайомитись з засобами реалізації статичних регуляторів.

Основні теоретичні відомості

При дослідженні впливу жорсткого зворотного зв'язку (ЗЗ) на якість роботи САР у якості початкової САР використаємо систему, принципова і функціональна схеми якої наведені на рис. 3.1, 3.2. Охопимо негативним зворотним зв'язком виконавчий механізм (ВМ) і золотниковий підсилювач (ЗП). Для цього вихід ВМ подамо через пристрій ЗЗ на вхід ЗП. Конструктивно пристрій зворотного зв'язку показано пунктиром на рис. 3.1. На функціональній схемі (рис. 3.2) пунктиром показано, як включено пристрій ЗЗ (ПЗЗ). Структурно цей пристрій є підсилювальною ланкою та може бути описаний рівнянням

$$h_{33} = k_{33} h_{\text{ВМ}},$$

де k_{33} – коефіцієнт передачі пристрою (важеля) зворотного зв'язку;

$h_{\text{ВМ}}, h_{33}$ – відносні переміщення поршня ВМ і важеля на виході ПЗЗ (гільзи золотникового підсилювача).

При включенні зворотного зв'язку рівняння золотникового підсилювача прийме вигляд

$$G_{зп} = k_{зп} (h_{зп} - h_{зз}).$$

Інші рівняння елементів САР не змінюється, їх варто використати з роботи № 3.

Робота САР у цілому не змінюється, але при введенні жорсткого зворотного зв'язку кожному положенню поршня виконавчого механізму відповідає нове положення гільзи золотникового підсилювача. Із цієї причини рівноважне положення золотника, а отже, і частота обертання будуть змінюватися при зміні навантаження на вала ДВЗ.

Структурну схему САР наведено на рис. 4.1.

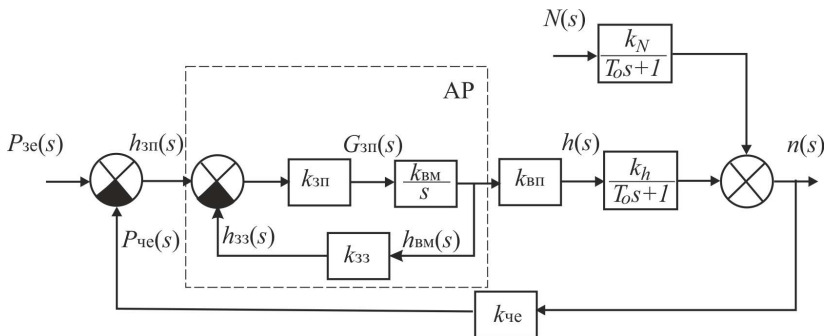


Рис. 4.1. Структурна схема САР

При включенні зворотного зв'язку передаточна функція автоматичного регулятора $W_{ар}(s)$ може бути одержана наступним чином:

$$W_{ар} = \frac{k_{зп} \frac{k_{БМ}}{s}}{1 + k_{зп} \cdot \frac{k_{БМ}}{s} \cdot k_{зз}} = \frac{k_{зп} \cdot \frac{k_{БМ}}{s}}{\frac{s + k_{зп} \cdot k_{БМ} \cdot k_{зз}}{s}} =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{k_{3\Pi} \cdot k_{\text{BM}}}{k_{3\Pi} \cdot k_{\text{BM}} \cdot k_{33} \left(\frac{1}{k_{3\Pi} \cdot k_{\text{BM}} \cdot k_{33}} s + 1 \right)} = \\
 &= \frac{1}{\frac{k_{33}}{T_{\text{ap}} s + 1}} = \frac{k_{\text{ap}}}{T_{\text{ap}} s + 1},
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

де $k_{\text{ap}} = \frac{1}{k_{33}}$ – коефіцієнт передачі автоматичного регулятора;

$T_{\text{ap}} = \frac{1}{k_{3\Pi} \cdot k_{\text{BM}} \cdot k_{33}}$ – постійна часу регулятора.

Регулятор, що має передаточну функцію виду (4.1) називають реальним пропорційним регулятором (П – регулятором). Чим менша постійна часу T_{ap} , тим більше реальний регулятор приближається до ідеального з передаточною функцією $W_{\text{ap}} = k_{\text{ap}}$.

Схему набору моделі САР частоти обертання вала ДВЗ з регулятором, що працює за пропорційним законом у Simulink наведено на рис. 4.2.

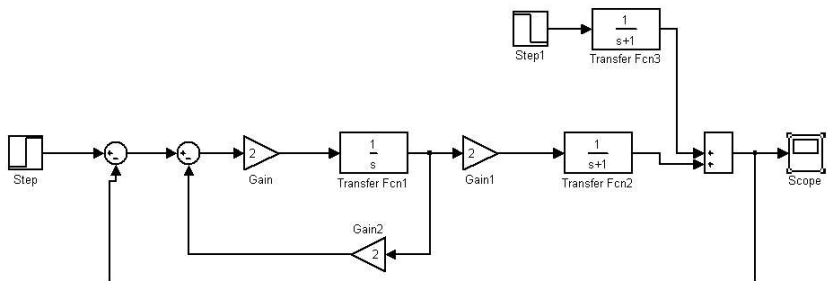


Рис. 4.2. Схема набору моделі САР частоти обертання вала ДВЗ з регулятором, що працює за П – законом у Simulink

Чисельні значення коефіцієнтів зворотного зв'язку наведені в табл. 4.1. Значення всіх інших коефіцієнтів взяти з табл. 3.1 або по вказівці викладача.

Таблиця 4.1

Коефіцієнти	Варіанти				
	1	2	3	4	5
k_{33}	0,01; 0,05; 0,5	0,02; 0,1; 0,6	0,03; 0,15; 0,7	0,04; 0,2; 0,8	0,05; 0,25; 0,9

Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Simulink.
2. Згідно з результатами аналізу перехідних процесів, отриманих в лабораторній роботі №3, визначити перехідний процес з найгіршими показниками якості.

3. Провести моделювання САР частоти обертання вала ДВЗ з регулятором, що працює за пропорційним законом на ПК у Simulink, використовуючи значення коефіцієнтів з табл. 3.1 – 4.1, відповідно до варіанта, визначеного згідно п. 2.

4. У Simulink одержати перехідну функцію САР при подачі впливу, що збурює і зміні параметрів настроювання регулятора. Для цього необхідно на вхід каналу впливу, що збурює подати імпульс N , згідно табл. 2.1. При цьому на вхід каналу впливу, що керує подати імпульс $P_{ze}=0$. Після цього, задаючись значеннями коефіцієнта передачі жорсткого зворотного зв'язку k_{33} згідно табл. 4.1, одержати та накреслити графіки перехідних функцій САР.

5. Змінити значення імпульсу N на величину визначену викладачем. Після цього, задаючись значеннями коефіцієнта передачі жорсткого зворотного зв'язку k_{33} згідно табл. 4.1, одержати графіки перехідних функцій САР.

Обробка результатів дослідження

1. За графіками отриманими згідно п. 4 порядку виконання

роботи, визначити наступні показники якості отриманих перехідних процесів: максимальне динамічне відхилення A_1 ; час регулювання t_p ; відносне перерегулювання σ ; ступінь загасання коливальності ψ , статичну помилку δ .

2. Побудувати функціональні залежності показників якості від значень коефіцієнта передачі жорсткого зворотного зв'язку k_{33} .

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

4. Використовуючи графіки, отримані згідно п. 5-6 порядку виконання роботи, побудувати статичну характеристику системи для кожного значення k_{33} .

5. Зробити висновки про вплив параметрів налаштування регулятора на показники якості САР.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Принципову й функціональну схеми САР, схему набору моделі САР у Simulink.

2. Рівняння й передаточні функції елементів САР.

3. Зняті криві перехідних процесів і результати їхньої обробки: залежності показників якості від змінюваних параметрів налаштування регулятора, статичну характеристику системи.

4. Висновки по роботі.

Питання для самоперевірки та захисту

1. Засоби реалізації П – закону регулювання.

2. Поняття ідеального та реального П- регулятора.

3. Устрій та принцип дії САР з П- регулятором.

4. Статична характеристика САР з П- регулятором.

5. Поняття нерівномірності регулювання.

6. Якість роботи САР. Показники якості.

7. Залежність нерівномірності САР від коефіцієнта передачі САР по регулюючій і збурюючій діям.

Лабораторна робота № 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГНУЧКОГО ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ЯКІСТЬ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ВАЛУ ДВЗ

Мета роботи: 1) дослідити вплив параметрів гнучкого зворотного зв'язку на якість роботи САР; 2) ознайомитись з деякими засобами реалізації пропорційно – інтегрального регулятора (ПІ – регулятора).

1. Теоретичні відомості для виконання роботи. Автоматичні регулятори, в яких використовується гнучкий зворотний зв'язок, реалізують пропорційно – інтегральний закон роботи (ПІ – закон).

Рівняння руху і передаточна функція ідеального ПІ – регулятора мають вигляд:

$$y = k_{\Pi} x + k_i \int x dt = k \left(x + \frac{1}{T_i} \int x dt \right);$$
$$W_{\Pi}(s) = k_{\Pi} \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = k_{\Pi} \frac{T_i s + 1}{T_i s}, \quad (5.1)$$

де $T_i = k_{\Pi} / k_i$.

При стрибкоподібній зміні регульованої величини на виході ПІ – регулятора дія у змінюється в часі як показано на рис. 5.1,*а*, на виході реального регулятора на рис. 5.1,*б*.

Реалізація ПІ – регулятора шляхом включення зворотного зв'язку з виходу підсилювального пристрою – рис. 5.2,*а* або з виходу виконавчого механізму рис. 5.1,*б*.

На структурній схемі 5.2,*а* підсилювач k_1 охоплено зворотнім зв'язком у вигляді аперіодичної ланки. На схемі 5.2,*б* підсилювач разом з виконавчим механізмом охоплено зворотнім зв'язком в вигляді реальної диференціюючої ланки.

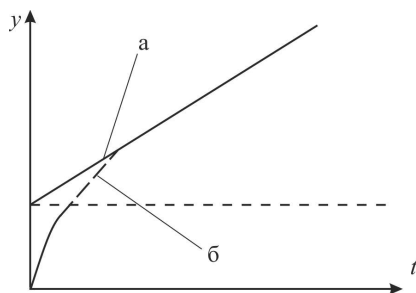


Рис. 5.1. Перехідні процеси ідеального *а*) і реального *б*) ПІ – регулятора

Конструктивна (принципова) схема пристрою гнучкого зворотного зв'язку приведена в роботі 6 на рис. 6.1.

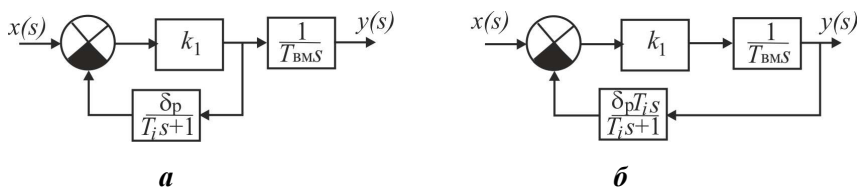


Рис. 5.2 Структурна схема реального ПІ – регулятора

Передаточні функції регулятора, що приведені на структурних схемах, можуть бути знайдені так:

$$W_{ap}(s) = \frac{k_1}{1 + (k_1 \delta_p / T_i s + 1)} \cdot \frac{1}{T_{BM} s} = \frac{k_1 (T_i s + 1)}{T_i s + 1 + k_1 \delta_p} \cdot \frac{1}{T_{BM} s} =$$

$$= \frac{k_1(T_i s + 1)}{(1 + k_1 \delta_p) \left[\left(\frac{T_i}{(1 + k_1 \delta_p)} \right) s + 1 \right]} \cdot \frac{1}{T_{BM} s}. \quad (5.2)$$

При $k_1 \delta_p \gg 1$ одиницею у виразі $1 + k_1 \delta_p$ можна знехтувати. Тоді передаточна функція регулятора:

$$\begin{aligned} W_{ap}(s) &= \frac{(1/\delta_p)(T_i s + 1)}{T_{BM} s (T_B s + 1)} \approx \frac{T_i}{\delta_p T_{BM}} + \frac{1}{\delta_p T_{BM} s} = \\ &= k_{\Pi} + (k_i / s) = k_{\Pi} \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right), \end{aligned} \quad (5.3)$$

де $T_B = T_i / k_1 \delta_p$ – постійна часу баластної ланки, яка при умові $k_1 \delta_p \gg 1$ має мале значення, а передаточна функція реального ПІ-регулятора наближається до передаточної функції (4.1) ідеального регулятора;

$k_{\Pi} = T_i / \delta_p T_{BM}$; $k_i = 1 / \delta_p T_{BM}$ – коефіцієнти передачі пропорційної та інтегральної складових регулятора.

Конструктивна схема ПІ – регулятора, що реалізована згідно до структурної схеми на рис. 5.2, **б** приведена в лабораторній роботі № 6 (рис. 6.1).

Схема набору САР з гнучким зворотнім зв'язком, що працює за реальним пропорційно-інтегральним законом привведена на рис. 5.3.

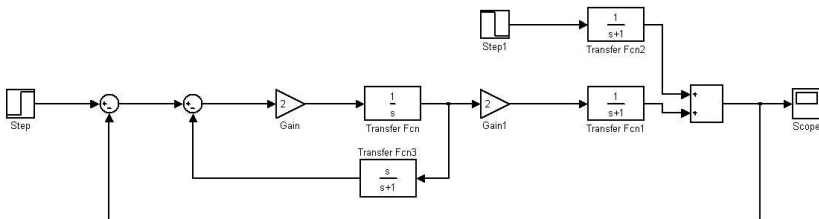


Рис. 5.3. Схема набору моделі САР частоти обертання вала ДВЗ , що працює за реальним ПІ законом регулювання в Simulink

Чисельні значення коефіцієнтів передаточних функцій САР з ПІ- регулятором наведені в табл. 3.1, 5.1.

При виконанні роботи за любым варіантом по вказівці викладача задаються значення всіх елементів, з тих, що були використані в лабораторних роботах 2,3. Значення параметрів гнучкого зворотного зв'язку δ_p та T_i змінюються згідно з табл. 5.1.

Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Simulink.
2. Одержати функціональну схему САР частоти обертання вала ДВЗ з регулятором, що працює за пропорційно – інтегральним законом відповідно до рівняння її елементів і принципової схеми.
3. Провести моделювання САР частоти обертання вала ДВЗ з регулятором, що працює за пропорційно – інтегральним законом на ПК у Simulink, використовуючи значення коефіцієнтів з табл. 3.1 та табл. 5.1, відповідно до варіанту, визначеного викладачем.
4. У Simulink одержати перехідні функції САР при подачі впливу, що збурює та зміні параметрів настроювання регулятора. Для цього необхідно на вхід каналу подачі впливу, що збурює подати імпульс N , згідно табл. 3.1. При цьому на вхід каналу впливу, що керує подати імпульс $P_{ze} = 0$. Після цього, задаючись значеннями параметрів гнучкого зворотного зв'язку δ_p та T_i згідно табл. 5.1, одержати графіки перехідних функцій САР.

Таблиця 5.1

Коефіцієнти	Варіанти				
	1	2	3	4	5
δ_p	1; 6; 11	2; 7; 12	3; 8; 13	4; 9; 14	5; 10; 15
T_i	0,1; 1; 20	0,2; 2; 21	0,3; 3; 22	0,4; 4; 23	0,5; 5; 24

Обробка результатів дослідження

1. За графіками отриманими згідно п. 4 порядку виконання роботи, визначити показники якості отриманих перехідних процесів.
2. Побудувати функціональні залежності показників якості від параметрів гнучкого зворотного зв'язку δ_p та T_i .
3. Проаналізувати результати п. 2 і визначити перехідні процеси з найкращими й найгіршими показниками якості.
4. Зробити висновки про вплив параметрів настроювання регулятора на показники якості САР.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Принципову й функціональну схеми САР, схему набору моделі САР у Simulink.
2. Рівняння й передаточні функції елементів САР.
3. Зняті криві перехідних процесів і результати їхньої обробки: залежності показників якості від змінюваних параметрів настроювання регулятора.
4. Висновки по роботі.

Питання для самоперевірки та захисту

1. Закони роботи промислових регуляторів.
2. Засоби реалізації ПІ закону роботи регулятора.
3. Умови приближення характеристик реального ПІ – регулятора до ідеального.
4. Принцип дії САР з гнучким зворотним зв'язком.
5. Залежність якості роботи САР від параметрів зворотного зв'язку.
6. Показники якості перехідного процесу.

Лабораторна робота № 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОДАТКОВОГО СИГНАЛУ ПО НАВАНТАЖЕННЮ НА ГЕНЕРАТОР НА РОБОТУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ДИЗЕЛЬ- ГЕНЕРАТОРА

Мета роботи: дослідження впливу на роботу САР частоти обертання вала ДВЗ наявності та параметрів додаткового сигналу по навантаженню, яке діє на ДВЗ.

1.Опис роботи САР. Принципову схему САР частоти обертання вала ДВЗ ДГ наведено на рис. 6.1. Система автоматичного регулювання частоти обертання ДВЗ описана в лабораторній роботі № 3. В роботі № 6 приводяться доповнення, що впливають на дію жорсткого зворотного зв'язку 12 (рис. 6.1) та сигналу по навантаженню з виходу електромагнітного приводу ЕП.

Система включає об'єкт регулювання -дизель, автоматичний регулятор з жорстким або гнучким зворотнім зв'язком та допоміжний сигнал за величиною навантаження. Згідно з класифікацією така система називається комбінованою.

Наявність зворотного зв'язку при двосторонньо діючому виконавчому механізмі робить САР статичною або астатичною в залежності від ступеня відкриття дроселя 16, САР, що працює за відхиленням, а при включенні допоміжного сигналу за величиною навантаження – комбінованою.

Комбіновані системи використовують як один із засобів реалізації інваріантної системи. Такі системи більш складні, але дозволяють суттєво покращити якість перехідного процесу регулювання.

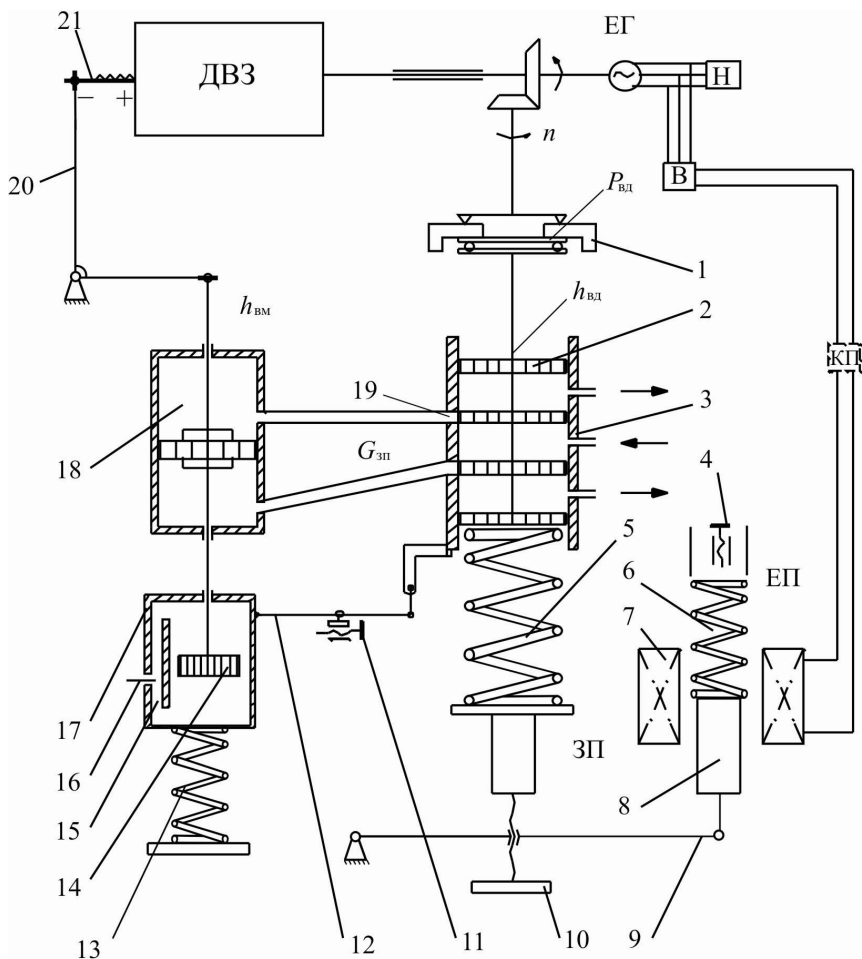


Рис. 6.1. Принципова схема САР частоти обертання дизель-генератора з додатковим сигналом по навантаженню

Згідно з іншими ознаками в класифікації, приведена система є електрогідравлічною, багатоконтурною, безперервною, лінеаризованою, а також, як уже згадувалося вище, працює за принципом відхилення з додатковим сигналом по збуджуючій дії з боку навантаження, яке створює електричний генератор (ЕГ), тобто є комбінованою.

До складу регулятора входять: пристрій, що вимірює – відцентровий датчик 1 обертів вала ДВЗ, золотниковий підсилювач, до складу якого входять плунжер – золотник 2 і гільза золотника 3, поршневий двосторонній виконавчий механізм 18, важільний механізм 20, орган, що регулює – рейка паливного насоса 21, пристрій від'ємного зворотного зв'язку 11–17, важіль зворотного зв'язку 12, випрямляч В, електромагнітний привід ЕП, що включає котушку 7, плунжер 8, важільну передачу 9, пристрій, що задає, який складається із пружини, що задає 5 і пристрою – гвинт-гайка 10 для зміни стискування пружини 5.

Пристрій зворотного зв'язку – пристрій ізодрому, включає в себе важіль 12, пружину 13, поршень 14, обвідний (байпасний) канал 15, дросельний клапан 16, пристрій для зміни коефіцієнта передачі зворотного зв'язку 11.

Об'єкт регулювання ДВЗ приводить в дію електричний генератор ЕГ, вироблена енергія підводиться до навантаження Н (до користувачів енергії).

Задана частота обертання $n_{зд}$ встановлюється попереднім стискуванням пружини 5 за допомогою пристрою 10 (гвинт-гайка в даному випадку). Вхідними координатами являються задаюча дія $n_{зд}$, збуджуюча дія N , що створюється навантаженням Н, яке включено в мережу електрогенератора ЕГ. Генератор приводиться в дію дизелем.

На усталеному режимі зусилля, що здійснює пружина 5 врівноважується зусиллям з боку відцентрового датчика 1, а виконавчий механізм 18 і регулюючий орган (рейка паливного насоса) 21 підтримують витрату палива до дизеля.

При зміні частоти обертання n ця рівновага порушується і регулятор змінює витрату палива доти не буде встановлено задану частоту обертання. Наприклад, при зменшенні n в результаті зростання навантаження N , зусилля, що розвиває відцентровий датчик також зменшиться, золотник 2 під дією пружини 5 переміститься вгору. Отвори 19 в гільзі золотника 3 відкриються таким чином, що верхня порожнина поршня виконавчого механізму 18 з'єднається з магістраллю високого тиску робочої рідини, а нижня – з магістраллю низького тиску, і поршень під дією різниці тисків зміститься вниз, важільна передача перемістить регулюючий орган 21 і витрата палива зросте. По закінченню перехідного процесу регулювання буде встановлено витрату палива таку, що відповідає новому навантаженню, при якому частота обертання рівна заданій (в астатичній системі).

Розглянемо вплив на роботу системи зворотного зв'язку та додаткового сигналу за дією, що збурює.

Дія зворотного зв'язку поліпшує якість роботи системи і залежить від параметрів налагодження. Пристрій зворотного зв'язку має два параметри налагодження – коефіцієнт передачі k_{33} та час ізодрому T_i , які можна змінювати гвинтовою парою 11 та величиною відкриття дроселя 16 відповідно.

Якщо дросель 16 знаходиться в закритому положенні і вважати, що потоків рідини не має, а рідина не стискувана, то поршень 14 і циліндр 17 будуть переміщуватись як одне ціле, то це буде випадок застосування жорсткого зворотного зв'язку. Тобто реалізується П-закон.

При повністю відкритому дроселі 16 і коли пружина 13 має таку жорсткість, що втримує циліндр 17 на місці, а поршень 14 переміщується вільно і переміщує робочу рідину із однієї порожнини в іншу через обвідний канал 15 і дросель 16. В цьому випадку гільза 3 золотникового підсилювача залишається нерухомою і зворотний зв'язок відсутній, як це було при І-законі роботи регулятора.

В третьому випадку, коли дросель 16 відкритий частково, на перехідних режимах будуть рухатись і поршень 14 і циліндр 17. Буде і взаємний рух поршня відносно циліндра, а в усталеному режимі, коли поршень виконавчого механізму 18 займе положення відповідне навантаженню, циліндр 17 і гільза 3 кожного разу за допомогою пружини 13 будуть займати одне й теж саме положення в статистиці, як це було при І-законі роботи регулятора, що дає змогу реалізувати астатичну систему. Як ми бачимо – в перехідному режимі зворотній зв'язок діє і реалізується пропорційний закон, а в усталеному – не діє і реалізується інтегральний закон. Таким чином ми маємо ПІ-закон, що дає змогу одержати високу якість перехідного процесу регулювання без залишкового відхилення. Конкретні установлені значення параметрів k_{33} і T_i залежать від властивостей об'єкта регулювання і заданих вимог до якості перехідного процесу регулювання.

Пристрій для подачі додаткового сигналу (ПДС) за дією, що збурює (навантаженню) включає електромагнітний привід ЕП, до якого входять гвинт 4, що задає з пружиною 6, котушка 7, плунжер 8 і важільна передача 9. Дія, що збурює – навантаження, що створюється на валу дизель-генератора оцінюється за величиною потужності. Так як напруга постійна, то за величиною струму I , що через випрямляч В підводиться до котушки 7 електромагнітного приводу ЕП, плунжер 8 приводиться в дію і, через важільну передачу 9, змінює натяг пружини 5, що задає. Величина дії ЕП може бути змінена пристроєм, що налагоджує – гвинтом 4 і пружиною 6.

При зростанні струму в навантаженні частота обертів вала ДГ зменшується, а сила дії електромагнітного приводу ЕП зростає, плунжер 8 втягується в котушку 7 на більшу відстань і через важільну передачу більше здавлює пружину 5, золотник 2 підіймається вгору і дає команду виконавчому механізму 18 переміщує регулюючий орган 21 і збільшує витрату палива G , а отже і частоту обертів вала n . В результаті чого

можливий такий випадок, що n при зміні навантаження не буде змінюватись в статиці і менше змінюватись в динаміці. В такому випадку і при роботі САР з пропорційним регулятором не буде остаточного відхилення регульованої величини n , тобто буде з допомогою комбінованої системи реалізовано астатичну систему. Щоб цього досягти необхідно вірно розрахувати і встановити параметри пристрою додаткового сигналу ПДС (рис.6.1). Для цього використовують пристрій, що корегує КП, який на структурній схемі (рис.6.3) позначено через $W_k(s)$ – це передаточна функція ПДС – пристрою, що корегує. Для цього необхідно мати математичний опис і передаточні функції всіх елементів системи.

2. Математичний опис окремих елементів САР. Функціональна схема САР приведена на рис. 6.2.

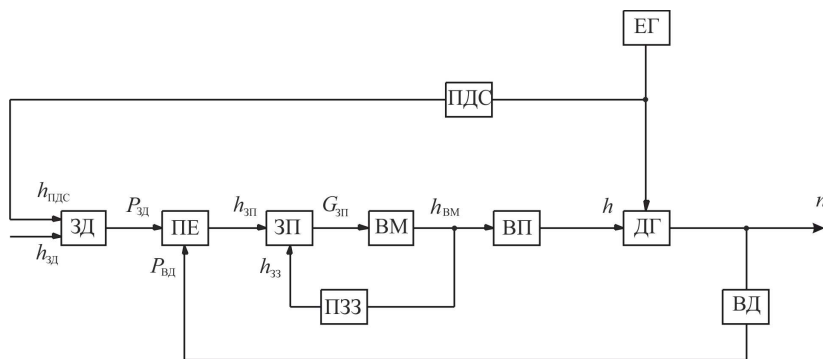


Рис. 6.2. Функціональна схема САР частоти обертання валу дизель-генератора з додатковим сигналом по навантаженню:

ЗД – пристрій, що задає; ПЕ – порівнювальний елемент;
 ЗП – золотниковий підсилювач; ВМ – виконавчий механізм;
 ПЗЗ – пристрій зворотного зв'язку; ВП – важільна передача; ПДС – пристрій додаткового сигналу; ВД – відцентровий датчик; ДГ – дизель-генератор; ЕГ – електрогенератор

Рівняння елементів системи, що записані в відносних відхиленнях мають вигляд:

– рівняння ДГ, як об'єкта регулювання

$$T_0 \frac{dn}{dt} + n = k_h h - k_N N;$$

– рівняння відцентрового датчика

$$P_{\phi\partial} = k_n n;$$

– рівняння золотникового підсилювача, елемента порівняння, пристрою, що задає і важільної передачі:

$$G_{зп} = k_{зп} (h_{зп} - h_{зз}); h_{зп} = P_{зд} - P_{вд}; \\ P_{зд} = k_{зд} h_{зд}; h = k_{вп} h_{вм};$$

– рівняння виконавчого механізму:

$$\frac{dh_{вм}}{dt} = k_{вм} G_{зп}.$$

Рівняння пристрою зворотного зв'язку, в залежності від положення дроселя 16, може бути таким:

а) дросель повністю відкрито: $h_{зз} = 0$;

б) дросель повністю закрито: $h_{зз} = k_{зз} h_{вм}$;

в) дросель частково відкрито: $T_i \frac{dh_{зз}}{dt} + h_{зз} = T_i k_{зз} \frac{dh_{вм}}{dt}$.

В рівняннях прийняті позначення:

T_0 – постійна часу об'єкта регулювання (ДГ);

$k_h, k_N, k_n, k_{зд}, k_{зп}, k_{ро}, k_{вм}, k_{зз}$ – коефіцієнти передачі ДГ за діями, що керують та збурюють, відцентрового датчика, пристрою, що задає, золотникового підсилювача, важільної передачі, виконавчого механізму, пристрою зворотного зв'язку;

T_i – час ізодрому (постійна часу пристрою зворотного зв'язку);

$n, h, N, h_{зд}, h_{зп}, h_{вм}, h_{зз}, G_{зп}, P_{вд}, P_{зд}$ – відносні відхилення

від базових значень частоти обертання вала, переміщення рейки паливного насоса, потужності користувача, зтяжки пружини, що задає, переміщення золотника золотникового підсилювача, переміщення штоку виконавчого механізму і пристрою зворотного зв'язку, витрати робочої рідини (масла) через вікна (отвори) золотникового підсилювача, зусилля, що розвивають грузи відцентрового датчика і пружина пристрою, що задає.

3. Структурна схема САР частоти обертання вала ДВЗ.

Структурна схема САР частоти обертання вала ДВЗ приведена на рис. 6.3.

На схемі прийняті позначення передаточних функцій: $W_{зп}(s)$, $W_{вм}(s)$, $W_{ро}(s)$, $W_{вд}(s)$, $W_0^h(s)$, $W_0^N(s)$, $W_{зз}(s)$, $W_k(s)$ – золотникового підсилювача, виконавчого механізму, регулюючого органу, відцентрового датчика, об'єкта регулювання по каналам дій, що регулюють та збуджують, пристрою зворотного зв'язку, пристрою сигналу, що доповнює (пристрою, що виробляє сигнал по навантаженню).

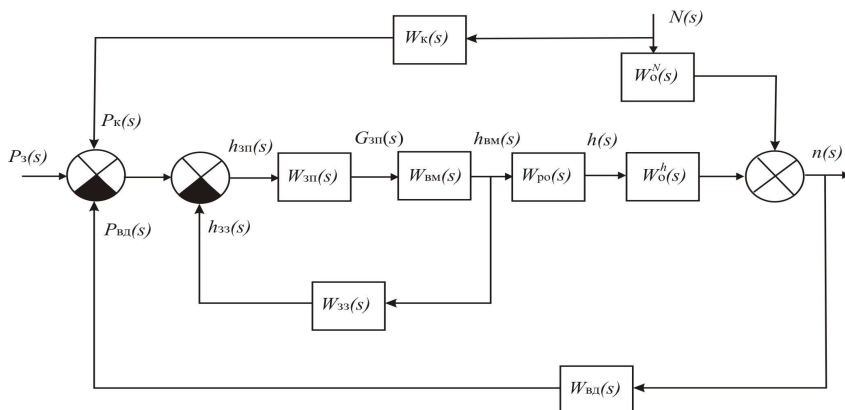


Рис. 6.3. Структурна схема САР частоти обертання вала ДВЗ

На основі структурної схеми (рис. 6.3) одержимо переда- точну функцію пристрою, що корегує в загальному вигляді. Для цього запишемо передаточну функцію замкненої САР по каналу дії, що збудує:

$$W_3^N(s) = \frac{n(s)}{N(s)} =$$

$$= \frac{W_K(s) \frac{W_{3\Pi}(s)W_{\text{BM}}(s)}{1 + W_{3\Pi}(s)W_{\text{BM}}(s)W_{33}(s)} \cdot W_{\text{po}}(s)W_0^h(s) + W_0^N(s)}{1 + \frac{W_{3\Pi}(s)W_{\text{BM}}(s)}{1 + W_{3\Pi}(s)W_{\text{BM}}(s)W_{33}(s)} \cdot W_{\text{po}}(s)W_0^h(s)W_{\text{вд}}(s)}.$$

Для того, щоб САР була інваріантною по каналу збуду- ючої дії N , потрібно виконання умови:

$$W_K(s) \frac{W_{3\Pi}(s)W_{\text{BM}}(s)}{1 + W_{3\Pi}(s)W_{\text{BM}}(s)W_{33}(s)} W_{\text{po}}(s)W_0^h(s) + W_0^N(s) = 0,$$

звідки передаточна функція пристрою, що корегує дорівнює:

$$W_K = - \frac{W_0^N(s)(1 + W_{3\Pi}(s)W_{\text{BM}}(s)W_{33}(s))}{W_{3\Pi}(s)W_{\text{BM}}(s)W_{\text{po}}(s)W_0^h(s)}. \quad (6.1)$$

Для випадку, коли дросель пристрою зворотного зв'язку 16 повністю закрито, тобто реалізується жорсткий місцевий зво- ротній зв'язок, передаточні функції елементів, що входять в вираз (6.1), з урахуванням рівнянь елементів, мають вигляд:

$$W_0^N(s) = \frac{k_N}{T_0s + 1}; \quad W_{3\Pi}(s) = k_{3\Pi}; \quad W_{\text{BM}}(s) = \frac{k_{\text{BM}}}{s};$$

$$W_{33}(s) = k_{33}; \quad W_0^h(s) = \frac{k_h}{T_0s + 1}; \quad W_{\text{po}}(s) = k_{\text{po}}. \quad (6.2)$$

Вираз (6.1) з врахуванням (6.2) запишеться так:

$$\begin{aligned}
 W_K(s) &= \frac{-\frac{k_N}{T_0 s + 1} \left(1 + \frac{k_{3П} k_{ВМ} k_{33}}{s} \right)}{\frac{k_{3П} k_{ВМ} k_{рО} k_h}{s(T_0 s + 1)}} = \frac{-\frac{k_N (s + k_{3П} k_{ВМ} k_{33})}{s}}{\frac{k_{3П} k_{ВМ} k_{рО} k_h}{s}} = \\
 &= \frac{-k_N k_{3П} k_{ВМ} k_{33} \left(\frac{1}{k_{3П} k_{ВМ} k_{33}} s + 1 \right)}{k_{3П} k_{ВМ} k_{рО} k_h}.
 \end{aligned}$$

За умови, що $\frac{1}{k_{3П} k_{ВМ} k_{33}} \approx 0$, отримаємо:

$$W_K(s) = -\frac{k_N k_{33}}{k_{рО} k_h}. \quad (6.3)$$

Враховуючи те, що пристрій сигналу, що виробляє додатковий сигнал конструктивно є електромагнітним приводом з важільною передачею на виході, то структурно його можна представити підсилювальною ланкою з передаточною функцією:

$$W_K(s) = k_K. \quad (6.4)$$

Коефіцієнт передачі пристрою, що корегує відповідно до (6.3) дорівнює:

$$k_K = -\frac{k_N k_{33}}{k_{рО} \cdot k_h}. \quad (6.5)$$

Коли потрібно мати пристрій, що корегує з більш складним законом роботи, його можна отримати з допомогою додатково включених елементів.

В загальному випадку, коли при корекції систем автоматичного управління необхідно визначити який пристрій потрібний і як його включити, звертаються до спеціального розділу теорії "Синтез САР".

Для виконання лабораторної роботи, потрібно підрахувати k_k , набрати згідно до рис. 6.4 структурну схему на ПК і одержати перехідний процес регулювання для значення k_k одержаного по (6.5) і для значень більшого та меншого від отриманого k_k в два рази. Чисельні значення коефіцієнтів рівнянь елементів регулятора і об'єкта приведені в табл. 3.1 та 6.1.

Схему набору моделі САР частоти обертання вала ДВЗ, при наявності додаткового сигналу по навантаженню у Simulink наведено на рис. 6.4.

Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Simulink.
2. Одержати функціональну схему САР частоти обертання вала ДВЗ при наявності додаткового сигналу по навантаженню відповідно до рівняння її елементів і принципової схеми.
3. Провести моделювання САР частоти обертання ДВЗ з регулятором, що працює за пропорційним законом на ПК у Simulink, використовуючи значення коефіцієнтів з табл. 3.1 та 6.1, відповідно до варіанта, визначеного викладачем.

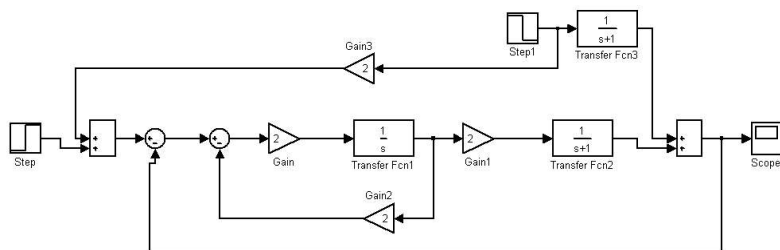


Рис. 6.4. Схема набору моделі САР частоти обертання вала ДВЗ при наявності додаткового сигналу по навантаженню у Simulink

4. У Simulink одержати перехідну функцію САР при подачі впливу, що збурює і зміні параметрів настроювання регулятора. Для цього необхідно на вхід каналу впливу, що збу-

рює подати імпульс N , згідно табл.2.1. При цьому на вхід каналу керуючого впливу подати імпульс $P_{зе}=0$. Після цього, задаючись значеннями коефіцієнта передачі додаткового сигналу по навантаженню k_k , одержати та накреслити графіки перехідних функцій САР.

5. Підрахувати значення коефіцієнта передачі додаткового сигналу по навантаженню k_k по формулі (6.5). Для отриманого k_k , одержати та накреслити графік перехідної функції САР.

6. Збільшити значення коефіцієнта k_k , отримане в п. 6 в 2 рази. Для отриманого k_k , одержати та накреслити графік перехідної функції САР.

7. Зменшити значення коефіцієнта k_k , отримане в п. 6 в 2 рази. Для отриманого k_k , одержати та накреслити графік перехідної функції САР.

Обробка результатів дослідження

1. За графіками отриманими згідно п. 5–8 порядку виконання роботи, визначити показники якості в залежності від виду перехідного процесу регулювання.

2. Побудувати функціональні залежності показників якості від значень коефіцієнта передачі додаткового сигналу по навантаженню k_k .

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

4. Зробити висновки про вплив параметрів настроювання регулятора та додаткового сигналу на показники якості САР.

Таблиця 6.1

Коефіцієнти	Варіанти				
	1	2	3	4	5
$k_{вм}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
k_{33}	0,1	0,3	0,5	0,7	1

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Принципову й функціональну схеми САР, схему набору моделі САР у Simulink.
2. Рівняння й передаточні функції елементів САР.
3. Зняті криві перехідних процесів і результати їхньої обробки: залежності показників якості від змінюваних параметрів настроювання регулятора, статичну характеристику системи.
4. Висновки по роботі.

Питання для самоперевірки та захисту

1. Поняття про інваріантність. Умови інваріантності.
2. Устрій та принцип дії комбінованої САР.
3. Якість перехідного процесу регулювання. Показники якості.
4. Залежність якості перехідного процесу регулювання від додаткового сигналу по дії, що збурює.
5. Устрій та принцип дії САР з додатковим сигналом по дії, що збурює.
6. Класифікація САР з додатковим сигналом по дії, що збурює.

Лабораторна робота № 7. СУДНОВИЙ КОТЕЛ ЯК ОБ'ЄКТ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ 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. Рівняння динаміки парового котла із природною циркуляцією. Котел як об'єкт регулювання рівня в барабані в залежності від типу економайзера має різні динамічні властивості.

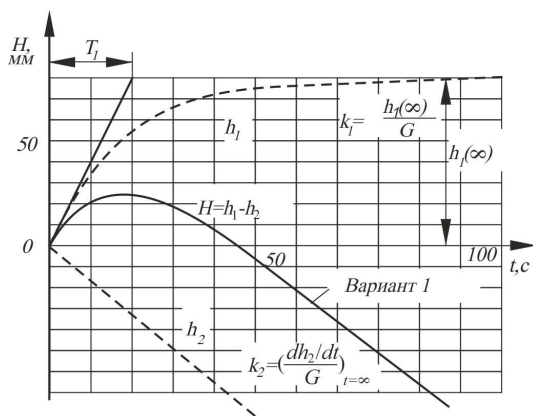
Використаємо експериментальний метод одержання рівняння динаміки.

На рис. 7.1 *а, б*, представлено 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 ланкою, коли використовується не "киплячий" економайзер, як відкритий бак з водою.

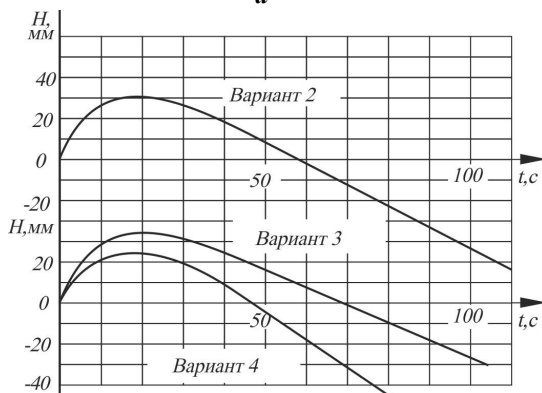
Справа в тому, що щільність рідини в баці незмінна, у той час як щільність пароводяної суміші в котлі змінюється разом з його навантаженням, тиском пари, температурою води й т. д.

При різкому збільшенні відбору пари з котла в перший момент відбувається "набрякання" рівня води, викликане

інтенсивним паротворенням за рахунок підвищеної тепло-
місткості котлової води стосовно тиску пари, що знизився.
Навпаки, при зменшенні навантаження тиск пари в котлі на
якийсь час збільшується й рівень води знижується, незважа-
ючи на інтенсивне живлення котла водою. Величина й три-
валість цих закидів залежить від параметрів котла.



a



б

Рис. 7.1. Зміна рівня в барабанах різних котлів при стрибкоподіб-
ному збільшенні відбору пари

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

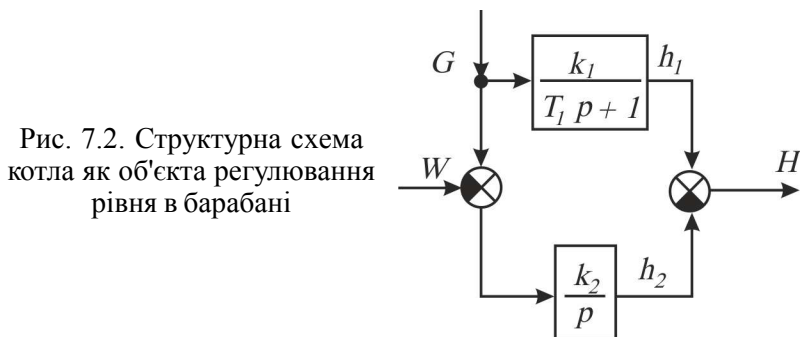
$$T_1 \frac{dh_1}{dt} + h_1 = k_1 G; \quad (7.1)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = k_2(W - G); \quad (7.2)$$

$$H = h_1 - h_2, \quad (7.3)$$

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, представлена на рис. 7.2.



Коефіцієнти рівнянь (1.1) і (1.2) T_1 , k_1 і k_2 отримують шляхом обробки двох складових перехідного процесу (рис. 7.1).

Використовуємо криві перехідних процесів, що на рис. 7.1 і отримуємо коефіцієнти рівнянь (1.1) і (1.2). На рис. 7.1,а, показано як криву перехідного процесу H (цільна крива) розкладено на дві криві, що представлені елементарними

ланками (пунктирні криві): аперіодичною, що представляє першу складову h_1 і інтегруючою, що відображає складову h_2 .

Для аперіодичної ланки необхідно отримати два коефіцієнти передаточної функції k_1 і T_1 . Коефіцієнт передачі k_1 отримаємо з виразу

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

В 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; постійна часу $T_1 = 20$ с, як значення відрізка часу від початку перехідного процесу $h_1(t)$ до перетину до- точної з лінією $h_1(\infty) = 80$ мм.

Для другої складової h_2 , що представлена інтегруючою ланкою необхідно одержати коефіцієнт передачі $k_2 = \left(\frac{\Delta h_2}{\Delta t}\right) / G = \left(\frac{48}{30}\right) / 5$, де, згідно до $h_2(t)$ (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. 7.1,*б*.

Схему набору моделі котла, як об'єкта регулювання рівня в барабані, у Simulink наведено на рис. 7.3.

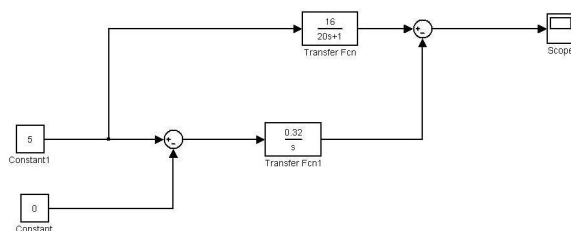


Рис. 7.3. Схему набору моделі котла, як об'єкта регулювання рівня в барабані, у Simulink

Порядок виконання роботи

1. Визначити за рис. 7.1, **б**, коефіцієнти k_1 , T_1 , k_2 згідно до заданого викладачем варіанту.
2. Запустити програму Simulink.
3. Виконати моделювання котла, як об'єкта регулювання рівня в барабані, у Simulink, згідно до структурної схеми та моделі, що приведені відповідно на рис. 7.2 та 7.3, використовуючи коефіцієнти отримані в п. 1.
4. У Simulink отримати динамічні характеристики котла, як об'єкта регулювання рівня в барабані, при подачі впливу, що збурює $G = 5$ кг/с, коли витрата живильної води не змінюється $W = 0$ кг/ск.
5. Отримати для випадку, що досліджується у п. 4, окремо динамічні характеристики аперіодичного ланцюга та інтегруючого.
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 згідно п. 4–5 визначити коефіцієнти k_1 , T_1 , k_2 та порівняти їх з отриманими за рис. 7.1, **б**.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

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 Simulink.
4. Отримані динамічні характеристики.
5. Висновки по роботі.

Питання для самоперевірки та захисту

1. Поняття об'єкта регулювання.
2. Розподіл об'єктів регулювання по виду динамічних характеристик.
3. Поняття динамічної характеристики. Види динамічних характеристик.
4. Фізичне розуміння постійної 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 № 8. ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЯТОРА РІВНЯ ВОДИ В БАРАБАНІ КОТЛА

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

1. Опис роботи системи. Регулятор рівня здійснює регулювання подачі живильної води в котел. Котел, як об'єкт регулювання рівня, є інтегруючою ланкою і можливість застосування інтегрального регулятора виключена, тому що система вийшла б структурно нестійкою. Із 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 довелося б установити мале значення коефіцієнта підсилення регулятора. А це небезпечно, особливо для висконапірних 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 двоімпульсний регулятор поєднує принципи регулювання по відхиленню й по навантаженню.

Схема двоімпульсного регулятора рівня, що використовується на суднах з паросиловими установками вітчизняного виробництва, представлена на рис. 8.1. Вимірювальний орган регулятора має дві мембрани: "мембрану рівня" 3 й "мембрану витрати" 13, що встановлені в корпусі вимірювального органу 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 і водяним просторами парового колектора.

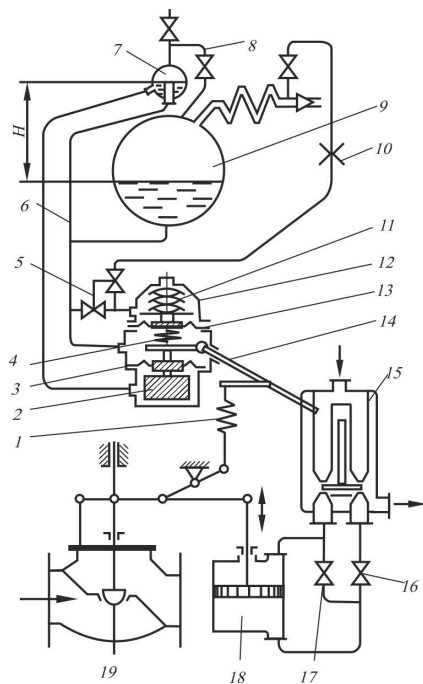


Рис. 8.1. Принципова схема двоімпульсного регулятора рівня води в барабані котла:

- 1 – жорсткий пружинний 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

Середня порожнина вимірювального органу сполучається з водяним простором парового колектора і паровим про-

стором 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 в колекторі котла. Тим самим мембрана вимірює значення рівня в колекторі.

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. Так як 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 й 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. Зворотнє 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 й зворотного зв'язку), то при хитах судна рівновага системи регулювання порушилася б. Дійсно, при крені висота стовпа води зменшилася б і стала рівної $H \cos \beta$, де H – висота зазна-

ченого 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 підвішеним до мембрани рівня вантажем 2. При хитавиці судна складова маси вантажу, що діє на мембрану рівня, змінюється по такому же закону, 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 поспідовно 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 заблокованих клапани 5, так що відкриття одного можливо лише при одночасному закритті другого. За допомогою цих клапанів верхня порожнина вимірювального органа може бути з'єднана з його середньою порожниною й 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 елемен-

том. Обхідний клапан 17 служить для переходу на ручне керування (для цього досить відкрити кран, з'єднавши обидві порожнини сервомотора).

Дросельна шайба 10, установлена 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 – навантаження на котел по витраті пари) була падаючою з невеликою нерівномірністю регулювання. На більших навантаженнях котла рівень доцільно підтримувати трохи меншим, тому що з ростом навантаження швидкість виходу пари із дзеркала випару збільшується, і високий рівень може привести 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 виміру витрати пари з котла), що спрощує схему регулятора рівня.

2. Рівняння динаміки регулятора. Регулятор складається з датчика 12 (див. рис. 8.1) підсилювача 15, важільної системи й пружини зворотного зв'язку 1. Отримування рівнянь вимірювального пристрою, підсилювача й сервомотора наведено у роботі.

Структурна схема САР представлена на рис. 8.2.

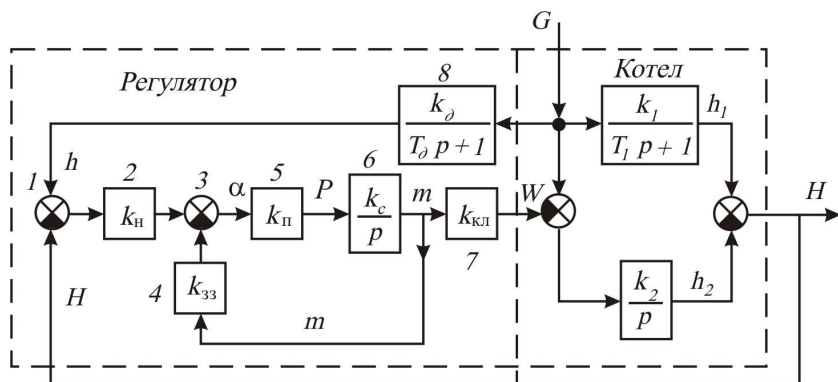


Рис. 8.2. Структурна схема САР рівня в барабані котла

Тут суматори 1 й 3, а також ланки 2 й 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. 8.1), що мають передаточні функції k_n і k_{33} , відповідно. Вимірник реагує на різницю тисків $h - H$, які створюють датчик витрати (h) і датчик рівня (H).

Датчик витрати представлений аперіодичною ланкою 8 (рис. 8.2), коефіцієнт підсилення якого k_δ зв'язує зміну перепаду тиску h [мм вод. ст.] і зміну навантаження на котел G . Постійна часу ланки T_δ залежить від діаметра дросельної шайби 10 й обсягу пари між верхньою мембраною вимірника 12 (див. рис. 8.1) і місцем установки дроселя. Для збільшення T_δ можна, крім зменшення діаметра дроселя, ще підключати додатковий об'єм (ресивер) в імпульсну трасу. Безінерційною ланкою 5 і інтегруючою 6 (див. рис. 8.2) 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. 8.1), а величину $k_{кл}$ – шляхом зміни профілю тарілки (профілю плунжера або співвідношення пліч важільної передачі, що приєднує виконавчий механізм до штока клапану).

Рівняння регулятора в абсолютних відхиленнях може бути представлено рівняннями датчика витрати (8.1), вимірювального пристрою (8.2) й підсилювача разом із сервомотором (8.3) і клапана (8.4):

$$T_\partial \frac{dh}{dt} + h = k_\partial G; \quad (8.1)$$

$$\alpha = k_H(h - H) - k_{33}m; \quad (8.2)$$

$$\frac{dm}{dt} = k_\Pi k_c \alpha; \quad (8.3)$$

$$W = k_{кл}m. \quad (8.4)$$

Виключимо α і m , підставивши їхні значення з (8.2), (8.4) в (8.3), 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

$$T \frac{dW}{dt} + W = k(h - H), \quad (8.5)$$

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

Отже, математичний опис САР буде представлено рівняннями об'єкта регулювання (7.1)-(7.3), рівнянням регулятора (8.5) і датчика витрати (8.1).

Коефіцієнти рівнянь (7.1)-(7.2) отримано в роботі 1 шляхом обробки експериментальних кривих (див. рис. 7.1), а для рівнянь (8.1), (8.5) беремо з табл. 8.1, відповідно до заданого варіанту.

Таблиця 8.1

Варіант	T	k	T_θ	k_θ
	с	(кг/с)/мм	с	(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 (8.5) має вигляд представлений на рис. 8.3.

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

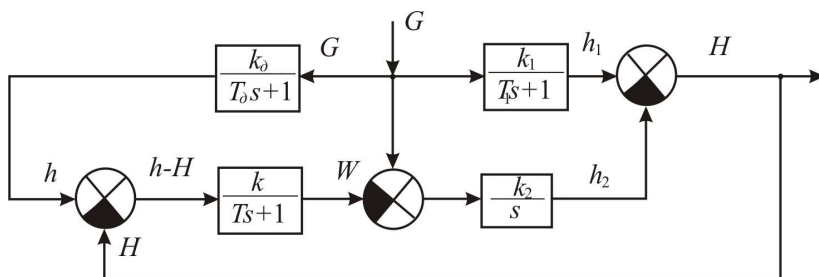


Рис. 8.3. Структура схема САР рівня в барабані котла, коли регулятор представлено однією ланкою

Схему набору моделі САР рівня у Simulink приведено на рис. 8.4.

Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Simulink.
2. Визначити коефіцієнти k_1 , T_1 та k_2 згідно до заданого викладачем варіанту (або використати результати роботи 1).
3. Виконати моделювання САР, згідно до системи, що приведена на рис. 8.4, і для даних, що приведені у табл. 8.1.
4. У Simulink одержати перехідні функції САР при подачі

впливу, що збурює $G = 5 \text{ кг/с}$ і при зміні параметрів налагодження регулятора.

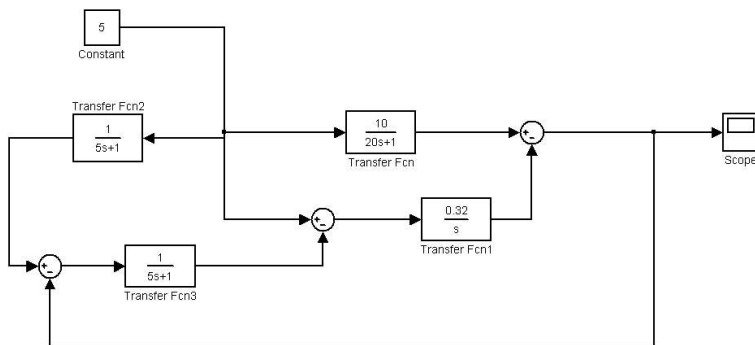


Рис. 8.4. Схема набору CAP рівня у Simulink

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 CAP.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Рівняння динаміки об'єкта й регулятора.
2. Наведені системи рівнянь до машинного виду.
3. Схему набору моделі CAP 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 по роботі.

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 їх функціонального призначення.
6. Пояснити як були отримані показники якості роботи і що вони визначають.
7. Пояснити в чому сутність статичного і астатичного об'єктів регулювання і до якого виду об'єкта відноситься об'єкт регулювання в лабораторній роботі.
8. Який закон роботи автоматичного регулятора реалізується в системі, що досліджується в лабораторній роботі.

Лабораторна робота № 9. 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. 9.1. Регулятор вимірює тиск у магістралі свіжої пари за допомогою сильфона 5. Зусилля від сильфона врівноважується натягом пружини 3, що задає, і пружини 6 зворотного зв'язку. 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. 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 з ростом навантаження на котел. Для того, щоб у паровому колекторі котла тиск при зростанні навантаження мало змінювався, місце відбору імпульсу вибирають у паропроводі свіжої пари (наприклад, за стопорним клапаном котла). Тоді тиск у колекторі буде більше тиску в місці відбору імпульсу на величину падіння тиску, обумовленого гідравлічними опорами на ділянці паропроводу від колектора до місця відбору імпульсу.

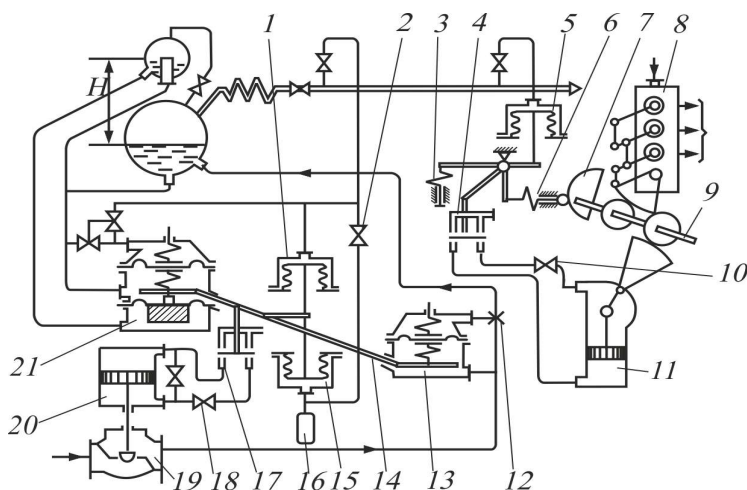


Рис. 9.1. Принципова схема системи автоматичного регулювання тиску й рівня з додатковим імпульсом по швидкості зміни тиску в котлі:

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

З ростом 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 і його 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, аналогічний 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 статична 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 трьох-імпульсних 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 відбу-

вається 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 статичі, 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 статичі 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. 9.1, приведена на рис. 9.2, де РТ і РР – регулятори, відповідно, тиску і рівня; КТ і КР – котел як об'єкт регулювання тиску і рівня.

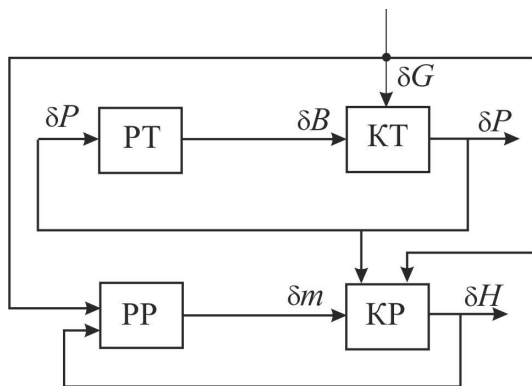


Рис.9.2. Функціональна схема САР тиску і рівня з додатковим імпульсом по швидкості зміни тиску в котлі

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:

$$T \frac{d\delta P}{dt} + \delta P = -\delta G + \delta B, \quad (9.1)$$

де $\delta P = \Delta P / P_{\text{н}}$ – відносна зміна тиску; $\delta G = \Delta G / G_{\text{н}}$ – відносна зміна витрати пари з котла (навантаження); $\delta B = \Delta B / B_{\text{н}}$ – відносна зміна витрати палива; індексом "н" позначені величини на номінальному режимі;

– рівняння регулятора тиску пари в котлі:

$$T_m \frac{d\delta B}{dt} + \delta B = -k_m \delta P; \quad (9.2)$$

– рівняння динаміки котла, як об'єкта регулювання рівня:

$$T_P \frac{d\delta H}{dt} = -\delta G + \delta m - T_{m1} \frac{d\delta P}{dt}, \quad (9.3)$$

де $\delta H = \Delta H / H_{\text{н}}$ – відносна зміна рівня; $\delta m = \Delta m / m_{\text{н}}$ – відносна зміна переміщення штока живильного клапана;

– рівняння регулятора рівня

$$T_c \frac{d\delta m}{dt} + \delta m = -k_{\text{н}} \delta H + k_G \delta G \pm T_{\text{к}} \frac{d\delta P}{dt} - k_W \delta W, \quad (9.4)$$

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

Прийmemo, 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:

$$T_c \frac{d\delta m}{dt} + (1 + k_w) \delta m = -k_H \delta H + k_G \delta G \pm T_k \frac{d\delta P}{dt}. \quad (9.5)$$

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

Запишемо (3.1) у вигляді:

$$\frac{d\delta P}{dt} = (-\delta G + \delta B - \delta P) \cdot k_1; \quad \delta P = \int \frac{d\delta P}{dt}, \quad (9.6)$$

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:

$$\frac{d\delta H}{dt} = (-\delta G + \delta m - T_{ap} \cdot \frac{d\delta P}{dt}) k_2; \quad (9.7)$$

$$T_{c1} \cdot \frac{d\delta m}{dt} + \delta m = -k_3 \cdot \delta H + k_4 \cdot \delta G \pm k_5 \cdot \frac{d\delta P}{dt}, \quad (9.8)$$

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

$$k_5 = \frac{T_k}{1 + k_w}.$$

Згідно рівнянь (9.2), (9.6) – (9.8) і функціональній схемі (рис. 9.2) 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.

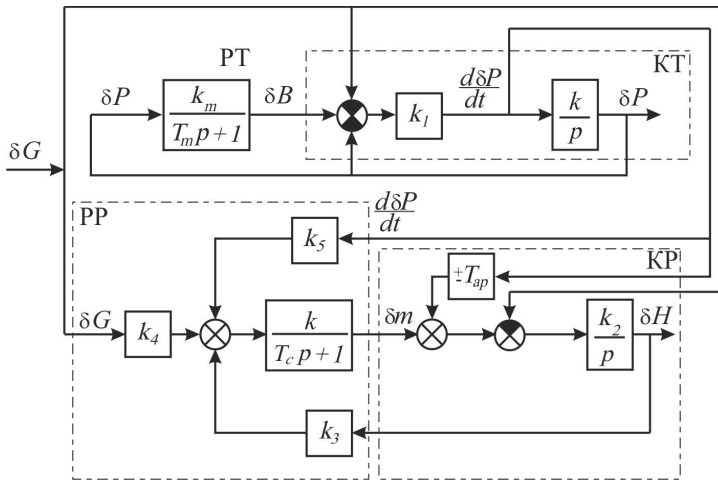


Рис. 9.3. Структурна схема САР тиску і рівня з додатковим імпульсом по швидкості зміни тиску в котлі в загальному вигляді

Чисельні значення коефіцієнтів наведені в табл. 9.1.

Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Simulink.
2. Виконати моделювання САР згідно до рис. 9.4 і встановити коефіцієнти відповідно до заданого викладачем варіанту. При цьому у блоці Transfer Fcn (див. рис. 9.4) 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 налагодження регулятора рівня k , T_c (блок Transfer Fcn 3), що забезпечують перехідний процес з найкращими показниками якості.

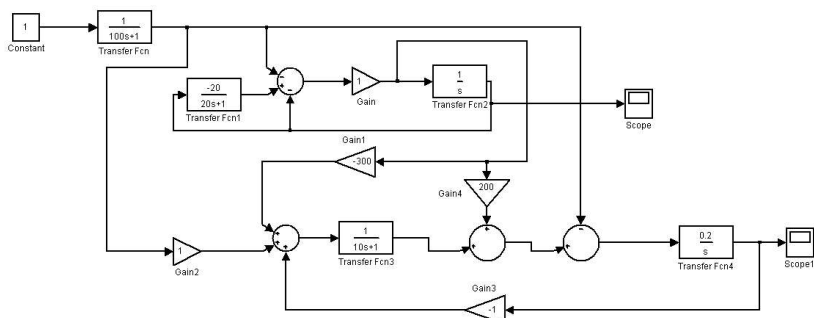


Рис. 9.4. Структурна схема САР тиску і рівня з додатковим імпульсом по швидкості зміни тиску в котлі для набору у Simulink

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).

Таблиця 9.1

Вар	δG	Котел по тиску		Котел по рівню		Регулятор тиску		Регулятор рівня				
		k_1 (блок Tr. Gain 2)	k (блок Tr. Gain 2)	$T_{ар}$ (блок Gain 4)	k_2 (блок Tr. Fen 4)	k_m (блок Tr. Fen 1)	T_m (блок Tr. Fen 1)	k_3 (блок Gain 3)	k_4 (блок Gain 2)	k_5 (блок Gain 1)	T_c (блок Tr. Fen 3)	k (блок Tr. Fen 3)
1	1	1	1	0,001; ± 50 ; ± 100 ; ± 250 ; ± 500	0,15	-5; -10; -20	20	-1	1	-300	10 20; 30	0,5; 1; 2
2	1	1	1	0,001; ± 50 ; ± 100 ; ± 250 ; ± 500	0,2	-5; -10; -20	20	-1	2	-400	10 20; 30	0,5; 1; 2
3	1	1	1	0,001; ± 50 ; ± 100 ; ± 250 ; ± 500	0,25	-5; -10; -20	20	-1	2,5	-350	10 20; 30	0,5; 1; 2
4	1	1	1	0,001; ± 50 ; ± 100 ; ± 250 ; ± 500	0,3	-5; -10; -20	20	-1	2	-400	10 20; 30	0,5; 1; 2
5	1	1	1	0,001; ± 50 ; ± 100 ; ± 250 ; ± 500	0,22	-5; -10; -20	20	-1	1,5	-300	10 20; 30	10 20; 30

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 в САР.
4. Отримані криві перехідних процесів і результати їхньої обробки (функціональні залежності показників якості від значень коефіцієнтів).
5. Висновки по роботі.

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 показати засоби знаходження показників якості.
6. Виконати класифікацію САР рівня.
7. Проаналізувати отримані результати дослідження.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Беляев, И. Г.** Автоматизация процессов в судовой энергетике [Текст]: Учебник для вузов / И. Г. Беляев, Н. Г. Курзенков, В. И. Седых, В. Н. Слесаренко. – М. : Транспорт, 2000. – 305 с.
2. **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического управления [Текст] / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Спб. : Профессия, 2003. – 752 с.
3. **Дьяконов, В. П.** Simulink 5/6/7 [Текст] : самоучитель / В. П. Дьяконов. – М. : ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.
4. **Исаков, Л. И.** Комплексная автоматизация судовых дизельных и газотурбинных установок [Текст] : учебник / Л. И. Исаков, Л. И. Кутын. – Л.: Судостроение, 1984. – 368 с.
5. **Ланчуковский, В. И.** Автоматизированные системы управления судовыми дизельными и газотурбинными установками [Текст] : учебник для вузов, 2-е изд., перераб. и доп. / В. И. Ланчуковский, А. В. Козьминых. – М. : Транспорт, 1990. – 335 с.
6. **Нелепин, Р. А.** Автоматизация судовых энергетических установок [Текст] / Р. А. Нелепин. – Л. : Судостроение, 1975. – 534 с.
7. **Попович, М. Г.** Теорія автоматичного керування [Текст] / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. – К. : Либідь, 2007. – 656 с.
8. **Толшин, В. И.** Автоматизация судовых энергетических установок [Текст] / В. И. Толшин, В. А. Сизых. – Учебн.-3-е изд. – М. : ТРАНСЛИТ, 2006. – 352 с.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
Лабораторна робота № 1. ОЗНАЙОМЛЕННЯ З ПАКЕТОМ ПРОГРАМ МАТЛАВ	4
Лабораторна робота № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ДВЗ ЯК ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ВАЛА	11
Лабораторна робота № 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ВАЛА ДВЗ З РЕГУЛЯТОРОМ, ЩО ПРАЦЮЄ ЗА ІНТЕГРАЛЬНИМ ЗАКОНОМ	19
Лабораторна робота № 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЖОРСТОКОГО ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ЯКІСТЬ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ВАЛУ ДВЗ ...	26
Лабораторна робота № 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГНУЧКОГО ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ЯКІСТЬ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ВАЛУ ДВЗ ...	31
Лабораторна робота № 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОДАТКОВОГО СИГНАЛУ ПО НАВАНТАЖЕННЮ НА ГЕНЕРАТОР НА РОБОТУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ДИЗЕЛЬ- ГЕНЕРАТОРА	36

Лабораторна робота № 7. СУДНОВИЙ КОТЕЛ ЯК ОБ'ЄКТ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ В БАРАБАНІ	49
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8. ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЯТОРА РІВНЯ ВОДИ В БАРАБАНІ КОТЛА	55
Лабораторна робота № 9. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ Й РІВНЯ ВОДИ В БАРАБАНІ КОТЛА	65
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	76