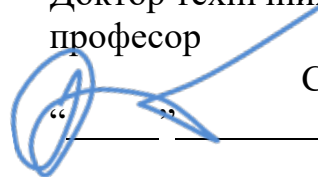


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій  
Кафедра авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри  
Доктор технічних наук  
професор

Синеглазов В.М.  
\_\_\_\_\_ 2024р.



# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО-КВАЛІФІКАЦІЙНОГО РІВНЯ  
“БАКАЛАВР”

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»

**Тема: НАЛАШТУВАННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ.  
АДАПТИВНІ СИСТЕМИ. (Комплексна)**

Виконавець: студент групи КП-324 Бстн Чубатюк Ілля Ігорович

Керівник: кандидат технічних наук, професор Аблесімов Олександр Костянтинівич

Нормоконтролер:



Філяшкін М.К.

Київ 2024

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ДТН, професор

Синеглазов В.М.

“ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

## ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи студенту

Чубатюку Іллі Ігоровичу

- 1. Тема роботи:** “НАЛАШТУВАННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ”
- 2. Термін виконання проекту (роботи):** з « 01 » 04 2024р по «25» 06 2024р.
- 3. Вихідні данні до роботи:** технічні параметри серійних систем стабілізації інерційних об'єктів керування.
- 4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):**
  - 1.Класифікація та області застосування систем стабілізації.
  - 2.Аналіз функціонального виконання багатоплощинних систем.
  - 3.Типова модель лінійної системи стабілізації.
  - 4.Визначення показників якості.
  - 5.Рівняння руху системи стабілізації.
  - 6.Дослідження якості систем стабілізації.
  - 7.Обґрунтування параметрів експлуатаційного налаштування.
  - 8.Діаграма якості систем стабілізації.
  - 9.Структура модуля автоматизованого налаштування.
  - 10.Визначення адаптивності систем керування.
  - 11.Спосіб експлуатаційних регулювань.
  - 12.Експериментальні дослідження адаптивних систем.
- 4. Перелік обов'язкового графічного матеріалу:**
  - 1.Типова функціональна схема системи стабілізації.
  - 2.Структурна схема системи стабілізації.
  - 3.Модель досліджуваних систем.
  - 4.Схеми адаптації.
  - 5.Залежності точності стабілізації від рівня адаптації.
  6. Спосіб експлуатаційних регулювань.
  7. Експериментальні дослідження адаптивних систем.

## 5. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	ПІДБІР ЛІТЕРАТУРИ	01.04-10.04	
2	АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЗАВДАНЬ І ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ	11.04-20.04	
3	ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ	21.04-31.04	
4	РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО НАЛАШТУВАННЯ	01.05-10.05	
5	НАЛАШТУВАННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ	11.05-19.05	
6	РОЗРОБКА ПРЕЗЕНТАЦІЇ	20.05-23.05	
7	ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ	24.05- 26.05	

6. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Керівник: професор \_\_\_\_\_ Аблесімов О.К.  
(підпис)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Чубатюк І. І.

## АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Налаштування та регулювання систем стабілізації. Адаптивні системи» : стор. - \_\_\_\_, рис. - \_\_\_\_, табл. \_\_\_\_, використаних джерел – \_\_\_\_.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ДИНАМІЧНИЙ ОБ'ЄКТ, СИСТЕМА СТАБІЛІЗАЦІЇ, АДАПТАЦІЯ, РЕГУЛЯТОР, КОНТУР НАЛАШТУВАННЯ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.

Об'єкт дослідження – системи стабілізації динамічних об'єктів.

Мета роботи – розробка методів автоматизації налаштування та забезпечення стійкості та якості систем стабілізації динамічних об'єктів, що працюють в умовах невизначеності.

Метод дослідження – структурно-параметричний синтез.

У роботі проведено аналіз основних завдань і принципів роботи систем стабілізації динамічних об'єктів, розглянута лінійна модель системи та виконано оцінку її можливостей з аналізу адаптивності системи стабілізації.

Автором досліджено вплив зміни параметрів систем стабілізації на їхню стійкість та якість, розроблено модуль автоматизованого налаштування систем, що працюють в умовах невизначеності.

Експериментальними дослідженнями підтверджено працездатність запропонованих методів адаптації.

Матеріали роботи рекомендується використовувати у навчальному процесі та при проведенні досліджень і розробці систем стабілізації динамічних об'єктів.

## ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

СС – система стабілізації.

ОК – об'єкт керування.

ДШ - датчик швидкості.

ДК - датчик кута.

ВП – виконавчий привод.

ЕП – підсилювач.

КП – контур підсумовування.

САК – система автоматичного керування.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЗАВДАНЬ І ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ .....	8
1.1 Класифікація та області застосування систем стабілізації .....	8
1.2 Аналіз функціонального виконання багатоплощинних систем .....	9
1.3 Типова модель лінійної системи стабілізації .....	11
1.4 Мета та завдання роботи .....	17
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ .....	19
2.1 Рівняння руху системи стабілізації.....	19
2.2 Визначення показників якості.....	21
2.3 Обґрунтування параметрів експлуатаційного налаштування.....	25
2.4 Аналіз діючих способів діагностування та налаштування .....	29
3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО НАЛАШТУВАННЯ.....	33
3.1 Діаграма якості систем стабілізації .....	33
3.2 Структура модуля налаштування .....	37
3.3 Розрахункові алгоритми комплексу .....	39
4. НАЛАШТУВАННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ .....	45
4.1 Визначення адаптивності систем керування .....	45
4.2 Експериментальні дослідження адаптивних систем .....	50
4.3 Спосіб експлуатаційних регулювань .....	57
ВИСНОВКИ .....	61
ЛІТЕРАТУРА.....	62

## ВСТУП

Системи стабілізації займають важливе місце у складі автоматизованих комплексів управління динамічними об'єктами. Їх метою є забезпечення значення керованої величини або її зміни за заданим законом управління. Точність системи стабілізації прийнято оцінювати величиною помилки регулювання вихідної координати.

Обґрунтування структури, синтез та забезпечення необхідних показників якості систем стабілізації є однією з найбільш відповідальних та складних проблем на етапах створення та експлуатації сучасних систем.

Під час роботи систем стабілізації параметри об'єкта керування та регулятора можуть змінюватись з різних причин у досить широких межах. Крім того, у процесі розробки систем не завжди є достовірна інформація про структуру об'єкта керування. У подібних випадках говорять про наявність параметричної та непараметричної невизначеностей. Параметрична невизначеність передбачає зміну у деяких межах параметрів системи із відомою структурою. Непараметрична чи структурна невизначеність свідчить у тому, що не повністю чи недостатньо точно визначено структуру елементів системи.

Невизначеності породжують у свою чергу невизначеність математичних моделей, що в кінцевому підсумку може призвести не тільки до суттєвих змін у показниках якості систем стабілізації, а й втрати ними стійкості. Отже, виникає необхідність розробки таких систем, які б зберегли стійкість і якість за умов невизначеності.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЗАВДАНЬ І ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

### 1.1 Класифікація та області застосування систем стабілізації

Системи стабілізації представляють собою спеціальні системи автоматичного управління, призначені для наведення та збереження заданого просторового положення об'єкта керування (платформи) при коливаннях його основи.

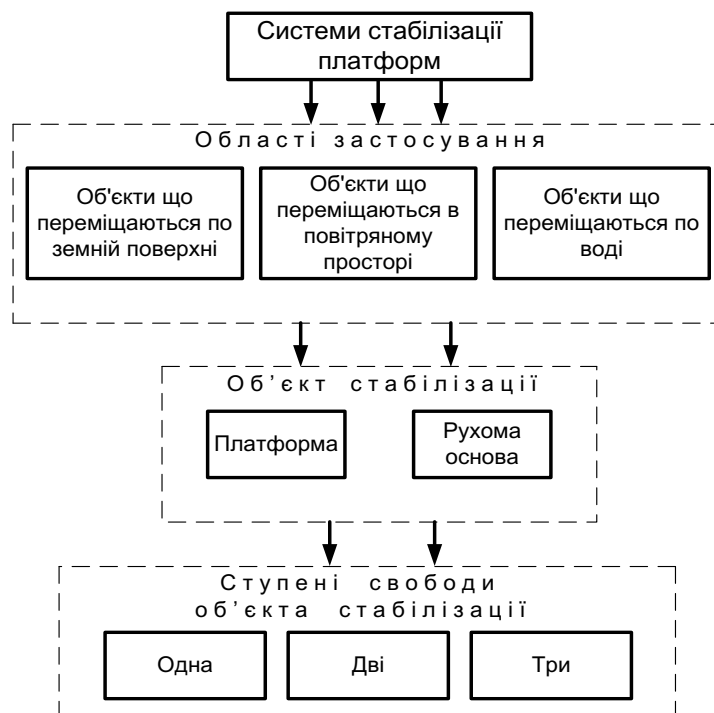


Рис.1.1 Класифікація систем стабілізації

Прикладами стабілізуючих систем можуть бути автопілот курсу літака, стабілізатор башти танка, система частотного автопідстроювання в радіоприймальних пристроях та ін.

Виходячи із завдань, покладених на об'єкти керування, основи, на яких вони встановлюються, можуть пересуватися по землі, переміщатися по повітрю, плавати по воді. При цьому стабілізація об'єктів керування на рухомих основах (рис.1.1) може здійснюватися в одній, двох або трьох площинах.

У багатьох випадках об'єктами, що стабілізуються, є самі рухливі основи, наприклад: літак, корабель, корпус автомобіля тощо.



## 1.2 Аналіз функціонального виконання багатоплощинних систем

Ключовими елементами будь-якої системи автоматичного керування (САК) є: об'єкт керування та регулятор.

Об'єктом керування називається робочий механізм, агрегат або машина, режими яких автоматизуються. Залежно від призначення і типу об'єкта, що автоматизується, керованими величинами можуть бути: швидкість, кутове або лінійне переміщення, напруга, струм, тиск, температура та ін.

Зміни керованих величин зумовлені природною властивістю об'єкта керування реагувати на вплив зовнішніх збурень, якими можуть бути навантаження, частота обертання, напруга джерел живлення, температура навколишнього середовища та ін.

Регулятором називається комплекс автоматично діючих приладів, механізмів і машин, які здійснюють управління режимом роботи об'єкта керування за певним заданим законом.

Дія регулятора змінює режим роботи об'єкта керування так, що вплив зовнішніх збурень на керовану величину автоматично компенсується. Наприклад, ракета з регулятором курсу летить не по природній, а по заданій траєкторії; напруга генератора з регулятором напруги не змінюється при зміні частоти обертання якоря; частота обертання валу виконавчого двигуна при наявності регулятора швидкості залишається постійною при змінах навантаження і т.д.

В загальному випадку, до складу регулятора входять виконавчий привід, датчики кутового відхилення та швидкості кутового відхилення об'єкта керування, підсилювачі та перетворювачі.

Як показує аналіз літературних джерел, незважаючи на те, що САК істотно різняться між собою за конструкцією, виконуються вони для кожної з площин стабілізації об'єкта керування за однотипними функціональними схемами.

Функціональна схема трьохплощинної системи стабілізації наведена на рис.1.2.

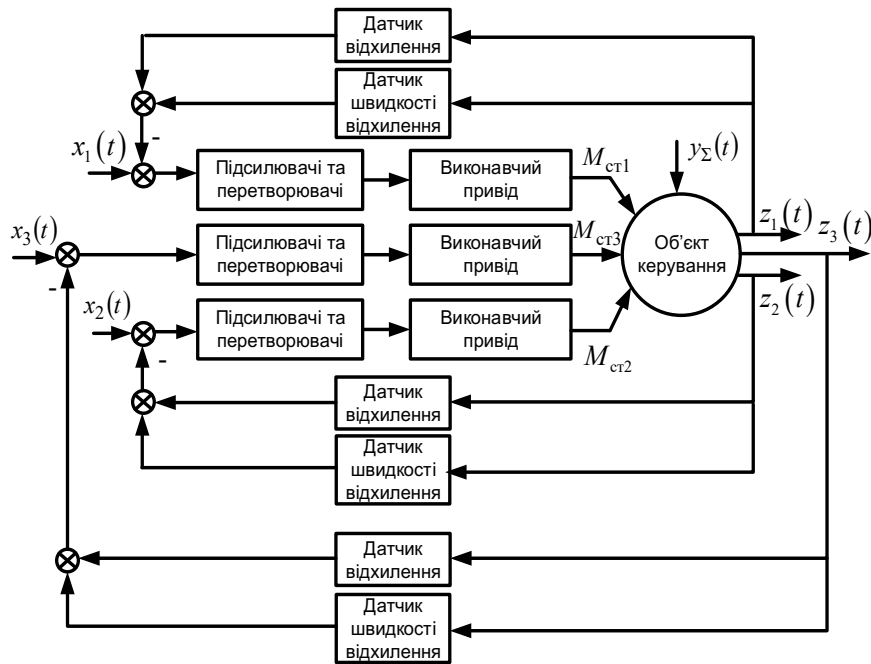


Рис. 1.2 Функціональна схема трьохплощинної системи стабілізації

Для кожної з площин система автоматичного керування являє собою замкнуту систему з регулюванням за відхиленням об'єкта керування від заданого напрямку.

Потрібний напрямок об'єкта керування задається за допомогою гіроскопічного датчика кута - датчика відхилення, що встановлюється безпосередньо на об'єкті.

Якщо під дією збурюючих моментів  $y_{\Sigma}(t)$ , обумовлених коливаннями рухомої основи, об'єкт керування відхилиться від заданого напрямку  $x_i(t)$ , то датчик виміряє відхилення, що виникло, і перетворить його в пропорційний електричний сигнал. Цей сигнал після підсилення та перетворення у підсилювально-перетворюючому пристрої подається на вхід виконавчого приводу системи. Останній формує момент стабілізації  $M_{ст.i}(t)$ , що протидіє збурюючим моментам  $y_{\Sigma}(t)$  і зменшує неузгодженість об'єкта керування з заданим напрямком. Чим повніше момент стабілізації буде компенсувати збурюючий момент, тим точніше буде здійснюватися стабілізація об'єкту.

Датчик швидкості відхилення вводиться до складу системи для підвищення інтенсивності гасіння коливань об'єкта керування. Датчик швидкості, як і датчик кута, встановлюється на об'єкті керування і вимірює швидкість його відхилення від заданого напрямку, перетворюючи її в пропорційний електричний сигнал.

Сигнали датчиків відхилення і швидкості відхилення підсумовуються на суматорі. Сумарна напруга являє собою керуючий сигнал виконавчого приводу.

Для компенсації впливу окремих найбільш інтенсивних зовнішніх збурень, в системах можуть створюватися спеціальні канали регулювання за збуренням (на рисунку не показані). Датчик збурень вимірює найбільш істотну складову зовнішнього збурення. Результати вимірювання перетворюються в пропорційний електричний сигнал. Посилений сигнал надходить на вхід виконавчого приводу у вигляді додаткового керуючого сигналу, під дією якого привід створює додаткову складову моменту стабілізації, компенсуючи зовнішнє обурення. Точність стабілізації системи підвищується.

### 1.3 Типова модель лінійної системи стабілізації

Системи стабілізації та керування можуть складатися з різних по фізичній природі, конструкції та параметрам елементів. Однак процеси регулювання, що протікають в цих системах, описуються подібними лінійними диференціальними рівняннями. Внаслідок цього їх структурні схеми ідентичні, що дозволяє отримати типову структурну схему системи стабілізації та керування.

Спершу проведемо аналіз основних елементів типової системи стабілізації.

#### ➤ Об'єкт керування

Розглянемо об'єкт керування, стабілізований щодо рухливої основи в одній площині. В такому разі рівняння його руху може бути знайдене у вигляді:

$$J_{\Sigma} \frac{d\Omega}{dt} + f_{\Sigma} \Omega = M_{y\Sigma} - M_c = M_0, \quad (1.1)$$

де  $M_{y\Sigma} = f_{\Sigma} \Omega_{\text{фк}} + M_{\text{н}\Sigma} + M_{\text{увп}}$  - сумарний момент, що збурює;

$M_0 = M_{y\Sigma} - M_c$  - результуючий момент.

Диференціальне рівняння дозволяє знайти абсолютну кутову швидкість об'єкта керування в горизонтальній площині.

Система рівнянь, що описують рух об'єкта керування, в операторній формі:

$$\left. \begin{aligned} (J_{\Sigma}s + f_{\Sigma})\Omega &= M_0 \\ M_0 &= M_{y\Sigma} - M_c \\ \Phi_0 &= \frac{1}{s}\Omega_0 \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

повністю аналогічна системі рівнянь, отриманій вище для об'єкта керування в горизонтальній площині.

На основі останньої системи рівнянь визначається передатна функція об'єкта керування

$$W(s) = \frac{\Phi_0}{M_0} = \frac{\Phi_0}{M_{y\Sigma} - M_c} = \frac{k_0}{(T_0s + 1)s} \quad (1.3)$$

і будується її структурна схема:

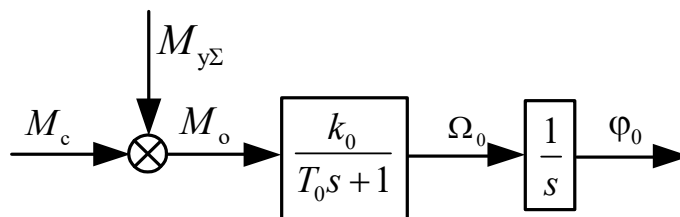


Рис.1.3 Структурна схема об'єкта керування

Таким чином, об'єкт керування можна представити як послідовне з'єднання інерційної ланки першого порядку, що перетворить результуючий момент  $M_0$  в абсолютну кутову швидкість  $\Omega_0$ , і ідеальної інтегруючої ланки, що перетворить цю швидкість у відповідний кут  $\Phi_0$ .

Передатний коефіцієнт  $k_0$  і постійна часу  $T_0$  відповідної передатної функції

$W_0(s) = \frac{k_0}{(T_0s + 1)s}$ , повністю визначаються конструктивними параметрами об'єкта

керування.

➤ Виконавчий привід

Виконавчий привід призначений для створення керуючого впливу на об'єкт керування.

Всі типи електромашинних і електрогідравлічних виконавчих приводів систем стабілізації аналогічні за своїми статичними характеристикам і динамічними властивостями і мають подібні структурні схеми.

У загальному випадку виконавчі приводи можуть бути представлені типовими динамічними ланками другого порядку (рис. 1.4).

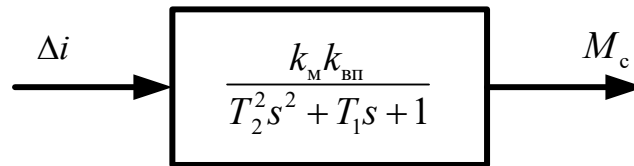


Рис.1.4 Структурна схема типового виконавчого приводу

➤ Гіроскопічний датчик кута

Гіроскопічний датчик кута (ДК), за допомогою якого задається напрямок об'єкта стабілізації  $\varphi_3$  й вимірюється неузгодженість  $\theta_0 = \varphi_3 - \varphi_0$ , при роботі в режимі стабілізації є практично безінерційною ланкою (рис.1.5).

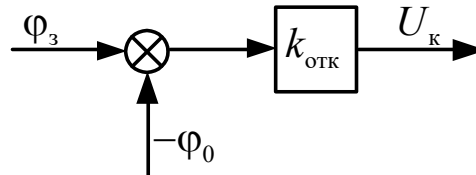


Рис.1.5 Структурна схема датчика кута

Його передатна функція має вигляд:

$$W_{\text{дк}} = \frac{U_{\text{дк}}}{\theta_0} = \frac{u_{\text{дк}}}{\varphi_3 - \varphi_0} = k_{\text{отк}}, \quad (1.4)$$

де  $k_{\text{отк}}$  - передатний коефіцієнт обертового трансформатора датчика кута.

➤ Гіроскопічний датчик швидкості

Гіроскопічний датчик швидкості (ДШ), що вимірює абсолютну кутову швидкість об'єкту, є інерційною ланкою другого порядку (рис. 1.6).

$$\text{Його передатна функція: } W_{\text{дш}}(s) = \frac{u_{\text{дш}}}{\Omega_0} = \frac{k_{\text{отш}} \frac{H}{C_{\text{т}}}}{T_4^2 s^2 + T_3 s + 1}, \quad (1.5)$$

де  $T_4 = \sqrt{\frac{J_y}{c_{\text{т}}}}$  й  $T_3 = \frac{f_y + f_d}{C_{\text{т}}}$  - постійні часу гіроскопічного датчика швидкості,  
 $C_{\text{т}}$  - жорсткість торсіона.

Відповідно до отриманої передатної функції, структурна схема датчика швидкості може бути знайдена як подано на рис. 1.6.

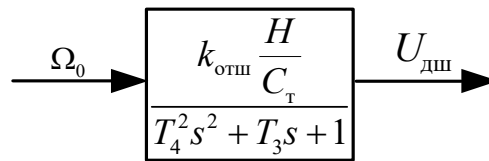


Рис 1.6 Еквівалентна структурна схема датчика швидкості

➤ Електронний підсилювач

Електронні підсилювачі систем стабілізації призначені для посилення сигналів управління по амплітуді і потужності та їх фазочуттєві випрямлення.

Зазвичай до складу електронних підсилювачів входять:

- два-три каскади підсилювачів напруги;
- фазочуттєвий каскад (фазочуттєвий підсилювач ФЧУ);
- каскади підсилювача потужності.

Вихідний каскад електронного підсилювача, як правило, виконується з диференціальною схемою. Вихідним сигналом електронного підсилювача є різниця струмів в обмотках попереднього підсилювача виконавчого приводу системи.

Електронний підсилювач практично без інерційний (рис.1.7).

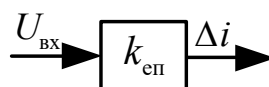


Рис.1.7 Електронний підсилювач

Його передатний коефіцієнт рівний:

$$k_{\text{еп}} = \frac{\Delta i}{U_{\text{вх}}} = k_{\text{пн}} k_{\text{фпн}} k_{\text{пш}}, \quad (1.6)$$

де  $k_{\text{пн}}$ ,  $k_{\text{фпн}}$ ,  $k_{\text{пш}}$  - статичні передатні коефіцієнти відповідно підсилювачів напруги, фазочутливого підсилювача та підсилювача потужності.

➤ **Контур підсумовування й регулювання сигналів керування**

Контур підсумовування (КП) призначений для підсумовування сигналів датчиків кута і швидкості. Контур підсумовування є вхідним контуром електронного підсилювача системи.

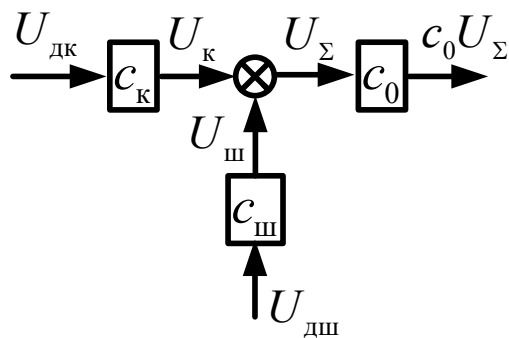


Рис.1.8 Структурна схема контура підсумовування

Величини передатних коефіцієнтів  $c_k$ ,  $c_{\text{ш}}$  і  $c_0$ , потенціометрів контуру підсумовування залежать від положення їх движків і можуть мінятися від нуля до одиниці.

Об'єднуючи наведені вище передатні функції елементів, отримаємо структурну схему типової системи стабілізації (рис. 1.9).

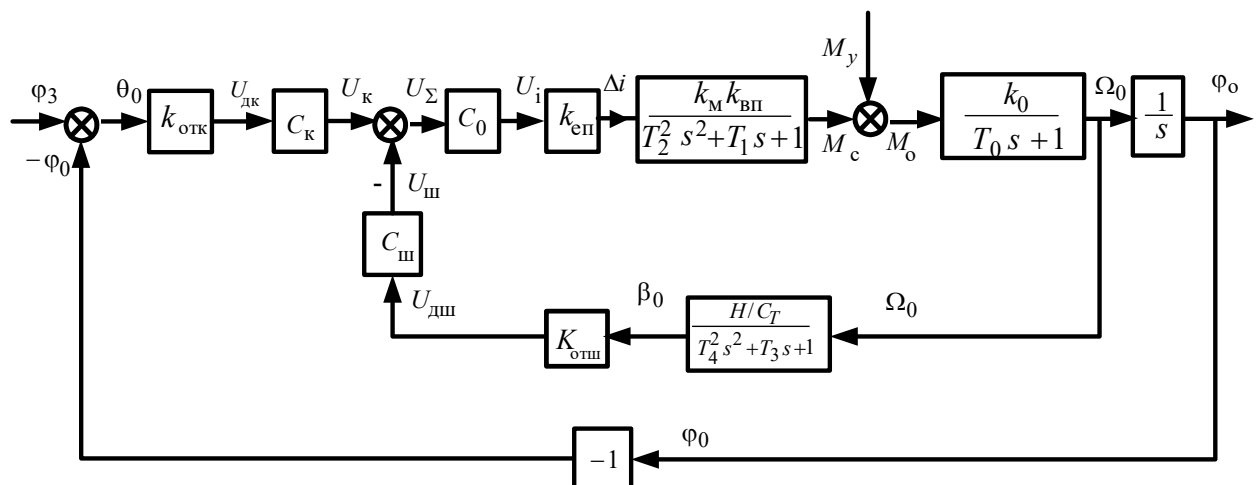


Рис 1.9 Структурна схема типової системи стабілізації

В результаті перетворень схема може бути приведена до вигляду, представленому на рис. 1.10.

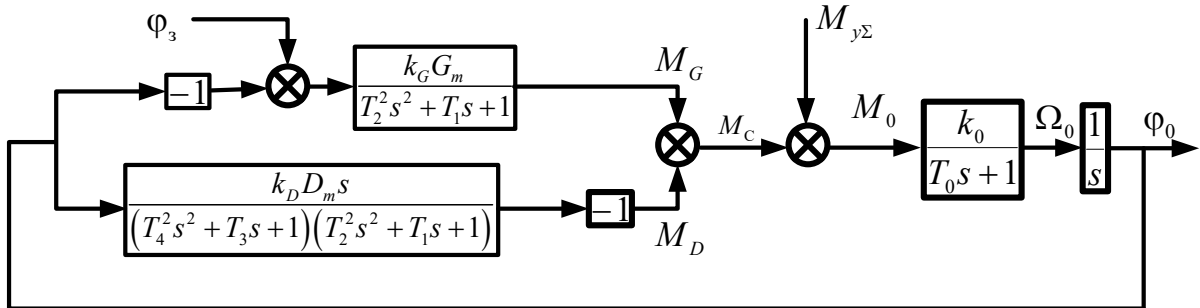


Рис 1.10 Типова структурна схема системи стабілізації

У схемі введено наступні позначення:

$G_m = k_{отк} k_{еп} k_M k_{вп}$  - конструктивна жорсткість системи;

$D = k_{отш} \frac{H}{C_T} k_{еп} k_M k_{вп}$  - конструктивне демпфування системи;

$k_G = c_k c_0$  - коефіцієнт регулювання жорсткості;

$k_D = c_{ш} c_0$  - коефіцієнт регулювання демпфування.

Жорсткість характеризує здатність системи протидіяти зовнішнім збуренням.

Вона визначається коефіцієнтами підсилення датчика кута  $k_{отк}$  і регулятора

$$k_{рег} = k_{еп} k_M k_{вп}.$$

Демпфування характеризує здатність системи гасити виникаючі у ній коливання. Демпфування залежить від коефіцієнтів підсилення датчика швидкості

$$k_{отш} \frac{H}{C_T} \text{ і регулятора } k_{рег} = k_{еп} k_M k_{вп}.$$

Жорсткість  $G = k_G G_m$  і демпфування  $D = k_D D_m$  системи безпосередньо впливають на формування моменту стабілізації  $M_c$  і визначають ефективність протидії системи зовнішнім збуренням

$$\overline{M}_c = \overline{M}_G + \overline{M}_D \equiv k_G G_m + k_D D_m.$$



Узагальнена структурна схема показує, що система стабілізації є позиційною системою автоматичного регулювання по куту неузгодженості (відхилення) об'єкта стабілізації щодо заданого напрямку і має:

- контур зовнішнього жорсткого негативного зворотного зв'язку по куту, ще зумовлений установкою гіроскопічного датчика кута на об'єкті стабілізації;
- контур гнучкого негативного зворотного зв'язку по кутовій швидкості, зумовлений наявністю в системі гіроскопічного датчика швидкості об'єкта стабілізації відносно корпусу.

Аналіз структурної схеми системи стабілізації дозволяє провести якісну оцінку загальних властивостей розглянутих систем. Для використання отриманих загальних співвідношень при кількісних розрахунках для кожного конкретного випадку мають бути визначені числові значення всіх передатних коефіцієнтів і постійних часу досліджуваної системи, а також значення сумарного збурюючого моменту або його основних складових.

#### **1.4 Мета та завдання роботи**

Під час роботи систем стабілізації параметри об'єкта керування та регулятора можуть змінюватись з різних причин у досить широких межах. Крім того, у процесі розробки систем не завжди є достовірна інформація про структуру об'єкта керування. У подібних випадках говорять про наявність параметричної та непараметричної невизначеностей.

Невизначеності породжують у свою чергу невизначеність математичних моделей, що в кінцевому підсумку може призвести не тільки до суттєвих змін у показниках якості систем стабілізації, а й втрати ними стійкості. Отже, виникає необхідність розробки таких систем, які б зберегли стійкість і якість за умов невизначеності.

Для забезпечення бажаної якості систем стабілізації при широкому діапазоні зміни характеристик об'єктів управління та зовнішніх збурень можуть бути запропоновані адаптивні системи.

Адаптацією називатимемо процес зміни параметрів або структури регулятора на основі поточної інформації з метою збереження постійним заданого показника якості управління при початковій невизначеності опису об'єкта та умов зовнішнього середовища.

Виходячи з вищевикладеного, основною метою роботи є:

Розробка методів автоматизації налаштування та забезпечення стійкості та якості систем стабілізації динамічних об'єктів, що працюють в умовах невизначеності.

При цьому були поставлені такі завдання:

- ✓ визначити основні завдання та принципи побудови систем стабілізації динамічних об'єктів;
- ✓ розробити типову модель лінійної системи стабілізації;
- ✓ визначити адаптивність систем керування;
- ✓ обґрунтувати параметри експлуатаційних налаштувань систем стабілізації;
- ✓ дослідити діючі способи діагностування та налаштування;
- ✓ розробити структуру модуля автоматизованого налаштування;
- ✓ визначити розрахункові алгоритми модуля налаштування;
- ✓ розробити модель адаптивної системи стабілізації;
- ✓ провести експериментальні дослідження адаптивних систем;
- ✓ обґрунтувати спосіб експлуатаційних регулювань адаптивних систем.

## РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ

### 2.1 Рівняння руху системи стабілізації

Структурну схему системи стабілізації відповідно до розділу 1 подано на рис.2.1.

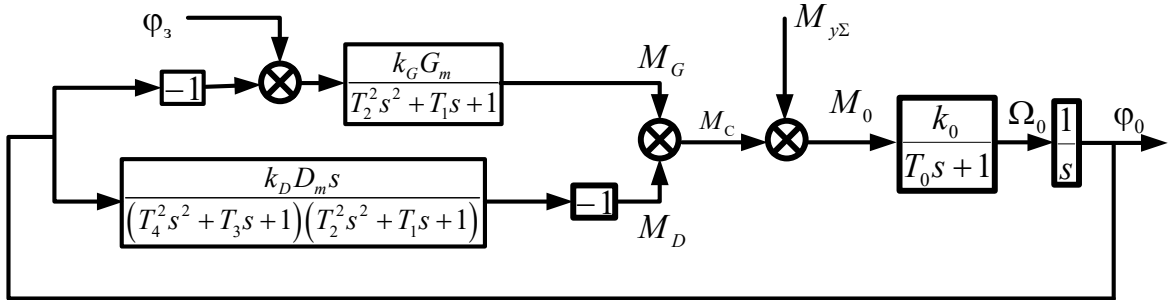


Рис 2.1 Структурна схема системи стабілізації

Для наочності сприйняття розрахунків, структурну схему (рис. 2.2) наведемо до стандартного вигляду (рис. 2.2).

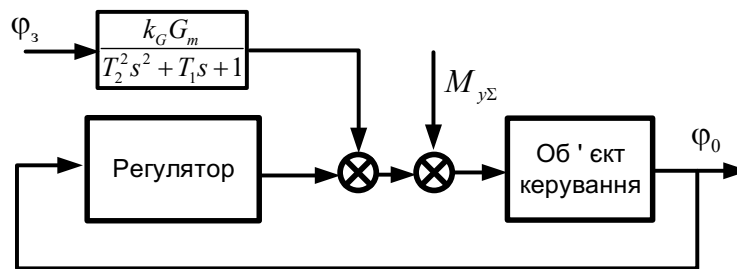


Рис 2.2 Стандартний вигляд схеми системи стабілізації

Зіставляючи представлені дві схеми, запишемо передатні функції регулятора

$$\begin{aligned}
 W_{\text{пер}}(s) &= \frac{k_G G_m}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1} + \frac{k_D D_m s}{(T_4^2 s^2 + T_3 s + 1)(T_2^2 s^2 + T_1 s + 1)} = \\
 &= \frac{k_G G_m (T_4^2 s^2 + T_3 s + 1) + k_D D_m s}{T_4^2 T_2^2 s^4 + (T_4^2 T_1 + T_3 T_2^2) s^3 + (T_4^2 + T_3 T_1 + T_2^2) s^2 + (T_3 + T_1) s + 1}
 \end{aligned}$$

та об'єкта керування

$$W_{\text{ок}}(s) = \frac{k_0}{(T_0s + 1)s}.$$

Отримаємо передатні функції по зовнішнім збуренням та по сигналу керування:

- передатна функція по зовнішнім збуренням

$$W_y(s) = \frac{\Phi_0}{M_{y\Sigma}} = \frac{W_{\text{ок}}(s)}{1 + W_{\text{пер}}(s)W_{\text{ок}}(s)} = \frac{\frac{k_0}{T_0s + 1} \cdot \frac{1}{s}}{1 + \frac{k_0}{T_0s + 1} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{k_G G_m (T_4^2 s^2 + T_3 s + 1) + k_D D_m s}{(T_4^2 s^2 + T_3 s + 1)(T_2^2 s^2 + T_1 s + 1)}} =$$

$$= \frac{k_0 (T_4^2 s^2 + T_3 s + 1)(T_2^2 s^2 + T_1 s + 1)}{A(s)}; \quad (2.1)$$

- передатна функція по сигналу керування

$$W_x(s) = \frac{\Phi_0}{\Phi_3} = \frac{k_G G_m}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1} \cdot \frac{W_{\text{ок}}(s)}{1 + W_{\text{пер}}(s)W_{\text{ок}}(s)} = k_G G_m \cdot \frac{k_0 (T_4^2 s^2 + T_3 s + 1)}{A(s)}. \quad (2.2)$$

В отриманих передатних функціях  $A(s)$  - характеристичний багаточлен шостого порядку

$$A(s) = a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + (T_0 + T_3 + T_1 + k_0 k_G G_m T_4^2) s^2 +$$

$$+ (k_0 k_G G_m T_3 + k_0 k_D D_m + 1) s + k_0 k_G G_m. \quad (2.3)$$

Коефіцієнти характеристичного багаточлена визначаються постійними часу елементів системи і дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} a_6 &= T_0 T_4^2 T_2^2; \\ a_5 &= (T_4^2 T_1 T_0 + T_3 T_2^2 T_0 + T_4^2 T_2^2); \\ a_4 &= (T_4^2 T_0 + T_3 T_1 T_0 + T_2^2 T_0 + T_4^2 T_1 + T_3 T_2^2); \\ a_3 &= (T_3 T_0 + T_1 T_0 + T_4^2 + T_3 T_1 + T_2^2). \end{aligned} \right\}$$

Загальний вигляд рівняння руху системи стабілізації:

$$\varphi_0 = W_x(s)\varphi_3 + W_y(s)M_{y\Sigma}, \quad (2.4)$$

де  $W_x(s)$  і  $W_y(s)$  передатні функції по сигналу керування та зовнішнім збуренням.

## 2.2 Визначення показників якості

Виконання системами стабілізації покладених на них функцій можливо тільки у тому випадку, коли вони є стійкими. Якщо система стійка, то всі перехідні процеси, що викликаються зовнішніми впливами, будуть згасаючими. Стійкість системи досягається лише при певному поєднанні її параметрів і забезпечується відповідними налаштуваннями у процесі експлуатації.

У теорії автоматичного керування розроблено спеціальні методи, що дозволяють судити про стійкість системи, базуючись на використанні так званих критеріїв стійкості.

Частотні критерії мають певні переваги над алгебричними. По-перше, не потрібно розв'язувати диференціальні рівняння систем, тим паче рівнянь високих порядків. По-друге їх наочність. По-третє – можливість використання частотних характеристик систем, які визначаються експериментально. За допомогою частотних критеріїв досить просто прийняти рішення про заходи щодо забезпечення стійкості системи, якщо в результаті досліджень отримано дані про те, що вона нестійка.

Для дослідження стійкості процесів регулювання за критерієм Михайлова використовується характеристичний багаточлен  $A(s)$  замкнутої системи. Після підстановки  $s = j\omega$  характеристичний багаточлен представляється в комплексному вигляді  $A(s)|_{s=j\omega} = A(j\omega) = X(\omega) + jY(\omega)$  і на комплексній площині  $X(\omega) \rightarrow jY(\omega)$  будується його годограф, відповідний зміні частоти від  $\omega=0$  до  $\omega=\infty$ .

Система автоматичного регулювання стійка, якщо її годограф  $A(j\omega)$  при зміні частоти від 0 до  $\infty$  послідовно проходить число квадрантів комплексної площини, рівне порядку характеристичного багаточлена.

На рис 2.3 наведені годографи системи шостого порядку: годограф 1 відповідає стійкій системі, годограф 2 – системі, що знаходиться на межі стійкості, а годограф 3 - нестійкій системі.

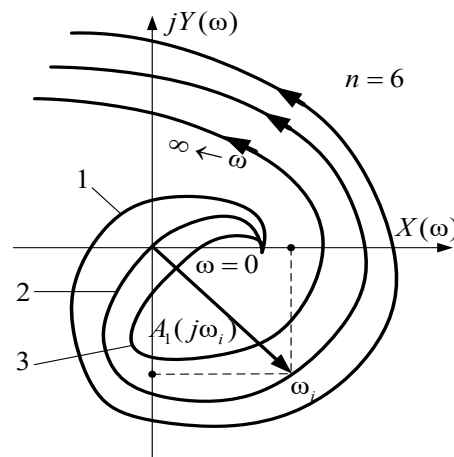


Рис. 2.3 Годографи Михайлова для систем шостого порядку

При проведенні експлуатаційних регулювань змінюються значення коефіцієнтів характеристичного багаточлена  $A(s)$ . Тому змінює свій вигляд і годограф.

На практиці для оцінки стійкості системи стабілізації може бути використана перехідна характеристика системи (рис. 2.6), тобто її реакція на ступінчасту дію. Стійкій системі відповідає загасаючий перехідний процес.

Крім вимог за стійкістю до процесів керування пред'являються, як правило, вимоги за точністю в сталому режимі та перехідному режимі роботи.

Найбільш характерними сталими режимами роботи систем стабілізації є режим стабілізації та режим слідування при постійних вхідних впливах.

Абсолютна статична помилка  $\Delta\varphi_0 = \frac{1}{G} M_{y\Sigma}$  є основним показником якості у режимі стабілізації при постійних сигналах.

Вона може бути розрахована з рівняння статички

$$\varphi_0 = W_x(0)\varphi_3 + W_y(0)M_{y\Sigma} = \varphi_3 - \frac{1}{G}M_{y\Sigma}, \quad (2.5)$$

$$\Delta\varphi_0 = \varphi_3 - \varphi_0 = \frac{1}{G}M_{y\Sigma},$$

або за статичними характеристиками

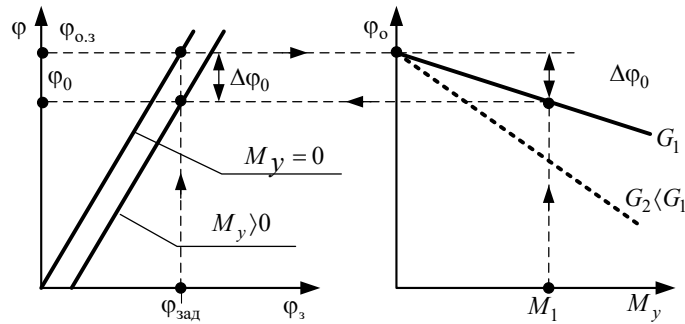


Рис. 2.4 Статичні характеристики системи стабілізації:  
а - регулювальна, б - навантажувальна

Помилка слідкування  $\theta_{\text{сл}}$  є основним показником якості у режимі слідкування при сигналах керування за законом  $k(t)$  функції

$$\theta_{\text{сл}} = \varphi_3 - \varphi_0 = \frac{D}{G}\Omega_0. \quad (2.6)$$

Помилка слідкування пропорційна швидкості стеження. Її величина пропорційна демпфуванню  $D$  і обернено пропорційна жорсткості  $G$  системи.

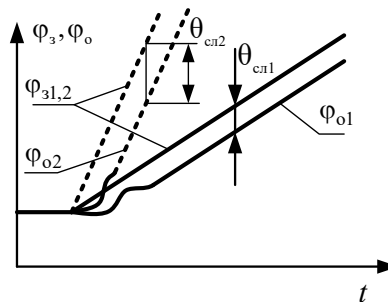


Рис. 2.5 Помилка системи в режимі слідкування

При експлуатаційних регулюваннях в цілях зменшення помилок слідкування доцільно зменшувати ступінь демпфування при збільшенні жорсткості  $G$  системи.

Характер перехідного процесу лінійної системи на відміну від стійкості залежить не тільки від параметрів системи, але й від вигляду збурюючого впливу.

Якщо до системи прикладений типовий зовнішній вплив типу одиничного ступінчастого сигналу, то основні показники якості можуть бути визначені за перехідною характеристикою.

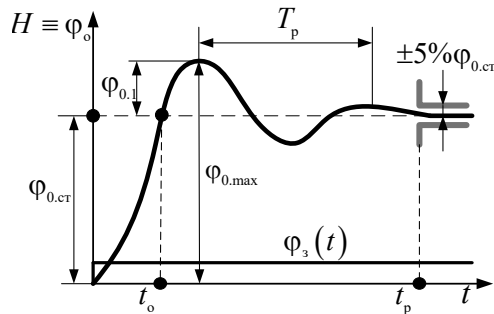


Рис. 2.6 Показники якості за перехідною характеристикою

Якість системи керування оцінюється багатьма показниками, серед яких основними є: час регулювання, час відпрацювання розузгодження, перерегулювання та коливальність.

Час регулювання, або час перехідного процесу,  $t_p$  - час, по закінченні якого відхилення величини  $\varphi_0(t)$ , від заданого значення  $\varphi_{0.ст}$  стає меншим ніж  $(2-5)\% \varphi_{0.ст}$ . Час регулювання характеризує швидкість загасання перехідного процесу.

Час відпрацювання розузгодження (час наростання)  $t_o$  - проміжок часу, за який величина, якою управляють, вперше досягає свого усталеного значення. Цей показник характеризує швидкість наростання процесу керування.

Перерегулювання  $\varepsilon$  - виражене у відсотках відношення максимального відхилення керованої величини до її усталеного значення:

$$\varepsilon\% = \frac{\varphi_{0.1}}{\varphi_{0.ст}} \cdot 100\% = \frac{y_{0.маx} - y_{0.ст}}{y_{0.ст}} \cdot 100\%$$



Коливальність  $n$  – кількість коливань величини, якою керують, на протязі перехідного процесу. Ступінь коливальності залежить від конструктивних особливостей об'єкта і системи керування вцілому.

Усі названі показники суттєво залежать від параметрів системи. Тільки раціональний вибір параметрів налаштування дозволяє одержати необхідну якість систем стабілізації.

### **2.3 Обґрунтування параметрів експлуатаційного налаштування**

Основним показником якості системи стабілізації у динаміці прийнято вважати точність стабілізації об'єкта керування.

У реальних умовах зовнішні впливи, що діють на об'єкти керування, змінюються випадково, коли не можна заздалегідь встановити з повною визначеністю їх значення для будь-якого заданого наперед моменту часу. Взяти, наприклад, автопілот літака. Його роботу, зазвичай, визначають пориви вітру, коливання щільності атмосфери, зміна сили тяги двигуна, напруга живлення підсилювачів. На точність стабілізації курсу морського судна впливає морське хвилювання, напрям і сила вітру, режими роботи силової установки і т.д.

Під впливом зовнішніх збурень виникають відхилення об'єкта керування. Ці відхилення також мають випадковий характер. Тому для оцінки точності систем стабілізації застосовуються методи теорії ймовірності та статистичної динаміки.

В даний час точністю стабілізації прийнято вважати середньоамплітудне значення кутового відхилення  $\delta_A$  об'єкта керування від заданого напрямку.

Для повнішого дослідження системи стабілізації як системи автоматичного регулювання використовується середньоквадратична помилка  $\sigma$ . Значно рідше точність стабілізації оцінюється математичним очікуванням абсолютного значення відхилення  $\delta$  від заданого напрямку.

Визначення точності стабілізації є дуже трудомістким процесом. Експериментальне визначення точності стабілізації здійснюється або за допомогою кінозйомки або осцилографуванням сигналу датчика кута.

Перевагою методу осцилографування є можливість проведення випробувань при обмеженій видимості, а також простіша обробка результатів.

Якщо точність стабілізації визначається як середньоамплітудне значення кутових відхилень, то по осцилограмі (рис. 2.7 ) вимірюються амплітудні значення випадкових відхилень  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , а потім обчислюється їхнє середнє значення:

$$\delta_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Delta_i| m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\theta_i|$$

де  $m$  - масштаб графіка;  $N$  - число взятих до розрахунку амплітуд.

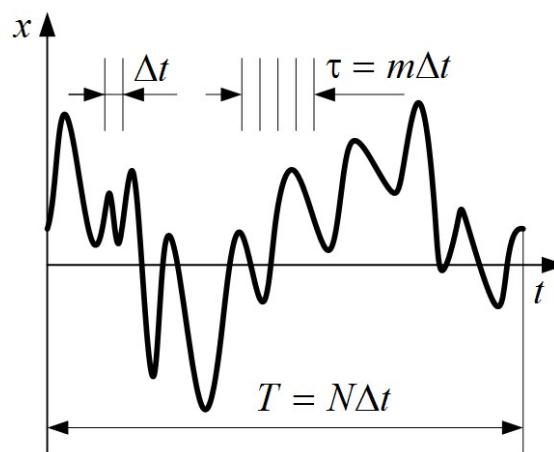


Рис.2.7 Осцилограма відхилень об'єкта керування

При такому методі визначення точності стабілізації інтервали між амплітудними відхиленнями можуть бути різними (випадковими).

Для визначення математичного очікування абсолютної величини відхилення за графіком вимірюються миттєві значення відхилень для великої кількості рівних інтервалів, а потім за формулою

$$\delta_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Delta_i| m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\theta_i|$$

з урахуванням масштабу  $m$  обчислюється математичне очікування відхилення.

Середньоквадратична помилка визначається як корінь квадратний із суми квадратів всіх відхилень об'єкта управління від заданого напрямку, поділеної на кількість вимірювань:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta_i m)^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_i)^2}.$$

Середньоквадратична помилка є загальноприйнятою мірою точності для промислових систем автоматичного регулювання, що працюють при випадкових збуреннях. Значення середньоквадратичної помилки стабілізатора дозволяє проводити його якісне порівняння з аналогічними системами автоматичного регулювання, що застосовуються у промисловості, транспорті, авіації та інших галузях техніки.

При розробці чи дослідженні систем стабілізації також виникає необхідність оцінки їх точності. Кінцевою метою оцінки точності є знаходження кореляційних функцій, спектральних щільностей і середньоквадратичних значень керованої величини.

Припустимо, що рівняння руху системи стабілізації (2.4) отримано:

$$\varphi_0 = W_x(s)\varphi_3 + W_y(s)M_{y\Sigma},$$

де  $W_x(s)$  і  $W_y(s)$  передатні функції по сигналу керування та зовнішнім збуренням, а ймовірнісні характеристики випадкового сигналу керування  $\varphi_3$  і збурювального впливу  $M_{y\Sigma}$  відомі.

Беручи до уваги випадковий характер сигналу керування і збурюючого впливу, маємо

$$S_{\varphi_0}(\omega) = |W_x(j\omega)|^2 S_{\varphi_3}(\omega) + |W_y(j\omega)|^2 S_{M_{y\Sigma}}(\omega), \quad (2.7)$$

де  $S_{\varphi_3}(\omega)$ ,  $S_{M_{y\Sigma}}(\omega)$  - спектральні щільності сигналу керування і збурювального впливу відповідно;

$|W_x(j\omega)|^2$ ,  $|W_y(j\omega)|^2$  - квадрати модулів частотних передатних функцій за сигналами керування та зовнішнім збуренням.

Після підстановки в (2.7) значень частотних передатних функцій згідно з (2.1), (2.2) отримуємо рівняння розрахунку спектральної щільності вихідного сигналу системи стабілізації

$$S_{\varphi_0}(\omega) = \left| k_G G_m \cdot \frac{k_0 (T_4^2 s^2 + T_3 s + 1)}{A(s)} \right|^2 S_{\varphi_3}(\omega) + \left| \frac{k_0 (T_2^2 s^2 + T_1 s + 1) (T_4^2 s^2 + T_3 s + 1)}{A(s)} \right|^2 S_{M_{y\Sigma}}(\omega). \quad (2.8)$$

Інтегрування останнього виразу на всьому діапазоні частот дозволяє визначити середньоквадратичне значення точності системи

$$\sigma_{\varphi_0} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\varphi_0}(\omega) d\omega}.$$

Зауважимо, що, як показують виконані теоретичні дослідження, будь який показник якості систем стабілізації, що характеризує її точність - абсолютна помилка  $\Delta\varphi_0$ , помилка слідкування  $\theta_{сл}$  або середньоквадратичне значення  $\sigma_{\varphi_0}$  безпосередньо залежить від їхньої жорсткості  $G = k_G G_m$  й демпфування  $D = k_D D_m$ , бо остані безпосередньо впливають на формування моменту стабілізації  $M_c$  і визначають ефективність протидії системи зовнішнім збуренням.

На рис. 2.8 наведено залежності точності стабілізації від жорсткості та демпфування, підтверджені досвідом експлуатації систем стабілізації динамічних об'єктів.

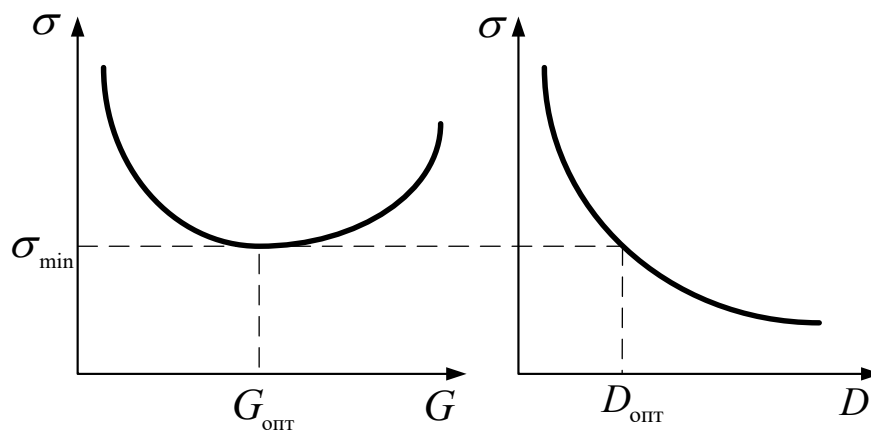


Рис. 2.8 Залежності точності стабілізації від жорсткості й демпфування

Таким чином, для забезпечення ефективного функціонування систем стабілізації, необхідне налаштування їх у ході експлуатації на оптимальну жорсткість та демпфування, що забезпечують максимальну точність (мінімальну помилку) системи.

## 2.4 Аналіз діючих способів експлуатаційного налаштування

Серед різноманіття параметрів, що характеризують якість систем стабілізації завжди, можна вибрати основні, контроль яких дасть вичерпну інформацію про їхній технічний стан.

Аналіз прийнятих в даний час схем організації налаштування систем стабілізації показує, що стан систем може бути повністю охарактеризований статичними та динамічними параметрами, значення яких не повинні виходити за допустимі межі.

Контроль технічного стану систем та їх налаштування прийнято здійснювати при регламентних роботах з метою запобігання відмовам, а також у разі призначенні ресурсу та обґрунтуванні експлуатаційних допусків на параметри системи.

Місцем організації та проведення діагностики та налаштування може бути як рухомий об'єкт, так і лабораторія (рухлива чи стаціонарна), що, власне, визначається видом регламентних робіт.

Методики налаштування, що застосовуються в даний час, залежать від умов роботи об'єкта керування - чи знаходиться він на рухомій основі або сам є рухомою основою, що стабілізується в просторі.

Методику діагностики та налаштування системи стабілізації об'єкта управління, що стабілізується у вертикальній площині щодо рухомої основи, ілюструють рис. 2.9 та 2.10.

Тут основними діагностичними показниками прийнято жорсткість  $G$  системи стабілізації та демпфування  $D$ .

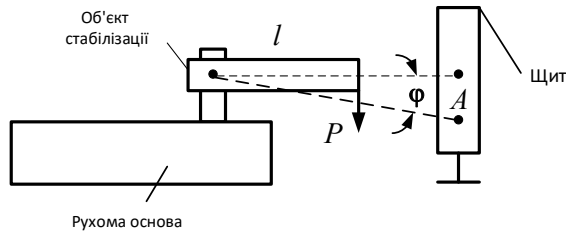


Рис 2.9 Методика діагностики жорсткості

Перед проведенням діагностики включають систему та дають їй опрацювати 10-15 хвилин з метою забезпечення необхідного температурного режиму вузлів та блоків. Як допоміжне обладнання застосовується щит з міліметровим папером, хомут з олівцем, що закріплюється на об'єкті керування, та динамометр.

На щиті з папером олівцем робиться мітка вихідного положення об'єкта стабілізації. Прикладаючи через динамометр до об'єкта керування зусилля  $P$  відхиляють його, наприклад, зверху вниз і роблять іншу позначку на щиті.

Позначимо відстань між мітками  $A$ . При довжині об'єкта керування рівною  $l$ , кутове його переміщення  $\varphi$  може бути визначене як:  $\varphi \cong \text{tg}\varphi = \frac{A}{l}$ .

Так як прикладений момент відомий  $M = Pl$ , то може бути розрахована жорсткість системи

$$G = \frac{M}{\varphi} = \frac{Pl^2}{A}.$$

За результатами кількох експериментів обчислюється середнє значення жорсткості. Отримане значення перевіряють на відповідність до вимог технічних умов. При необхідності здійснюється налаштування системи способами, визначеними конструктивним її рішенням.

Для перевірки ступеня демпфування системи об'єкту керування надається з пульта управління максимальна швидкість руху.

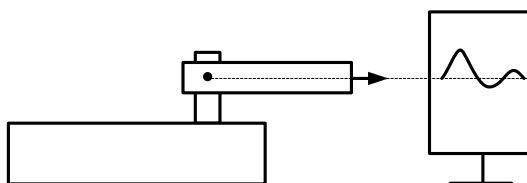


Рис. 2.10 Методика діагностики демпфування

При досягненні об'єктом керування горизонтального положення сигнал пульта обнулюється. У момент, коли об'єкт керування здійснює перехідний процес, оператор простягає перед олівцем, розміщеним на об'єкті керування, у горизонтальній площині щит з міліметровим папером. Внаслідок експерименту отримуємо перехідні характеристики системи. За ними відомими методами оцінюється демпфування.

Отримане значення перевіряють на відповідність до вимог технічних умов. За потреби здійснюється налаштування системи способами, визначеними її конструктивним рішенням.

Аналіз літературних джерел показує, що розглянута методика у тому чи іншому варіантах застосовується для всіх систем, об'єкти керування, яких стабілізуються щодо рухомих основ. Простота методики пояснюється можливістю включення та перевірки працездатності системи стабілізації при нерухомій основі.

У тих випадках, коли об'єктом стабілізації є власне рухома основа, подібні методи є принципово неможливими.

У подібних випадках реєстрація статичних характеристик виконується за допомогою перевірочних машин або установок, які мають у своєму складі необхідні вимірювальні прилади.

Перевірку статичних показників проводять за максимальної чутливості каналів системи, тобто. при найбільших допустимих коефіцієнтах посилення. Граничне допустиме посилення зазвичай відповідає межі виникнення автоколивального руху виконавчих приводів, а в цьому випадку швидкодія систем є максимальною.

Контроль динамічних характеристик здійснюється у часовій та частотній областях. Як показує досвід експлуатації та технічного обслуговування систем стабілізації рухомих основ, найбільш ефективним контролем динамічних характеристик слід вважати контроль характеристик замкнутої системи. Тому при дослідженнях у частотній області знімають та аналізують частотні характеристики систем стабілізації як ланки замкнутої системи.

При організації такого контролю в лабораторних умовах динамічні властивості системи відтворюються шляхом вирішення рівнянь їх руху в реальному масштабі часу, для чого застосовують обчислювальну техніку.

Виходячи з вищевикладеного відзначимо, що, незважаючи на різноманіття конструктивних рішень систем стабілізації динамічних об'єктів, принципово можуть бути розглянуті два основні підходи до їхньої діагностики та налаштування, що визначаються типом об'єкта стабілізації.

Їх аналіз показує, що технологічний процес діагностики та налаштування систем стабілізації рухомими основами, вельми трудомісткий і потребує значних фінансових витрат. З іншого боку - діагностика та налаштування систем стабілізації об'єктів керування, що працюють на рухомих основах, позбавлена зазначених недоліків. Водночас вона недостатньо точна внаслідок простоти вимірювально-перевірочного обладнання.

Методики перевірки систем часто відрізняються один від одного, оскільки визначаються організаціями-виробниками.

Усунення перелічених недоліків, забезпечення стандартизації та уніфікації способів діагностування та налаштування систем стабілізації рухомих об'єктів, підвищення їх ефективності та достовірності може бути досягнуто впровадженням на основі єдиного методологічного підходу автоматизованих систем із застосуванням комп'ютерно-інтегрованих комплексів.



## РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО НАЛАШТУВАННЯ

### 3.1 Діаграма якості систем стабілізації

Раніше було зазначено, що для забезпечення необхідної ефективності системи необхідно вибирати таке поєднання жорсткості та демпфування, при яких, крім стійкості, забезпечувалася б і оптимальність усіх параметрів якості.

Для вирішення цієї задачі пропонується використовувати метод  $D$  – розбиття, виділивши область стійкості системи стабілізації на площині  $G - D$  параметрів та розділивши її на зони якості.

При побудові області стійкості скористаємося критерієм Михайлова оцінки стійкості системи стабілізації. Після підстановки в характеристичний багаточлен розглянутої системи  $s \rightarrow j\omega$  отримаємо рівняння годографа Михайлова

Прирівнюючи нулю дійсну і уявну частини, матимемо

$$\left. \begin{aligned} X(\omega) &= -a_6\omega^6 + a_4\omega^4 - [a_2 + k_0G_rT_4^2]\omega^2 + k_0G_r = 0 \\ Y(\omega) &= a_5\omega^5 - a_3\omega^3 + k_0(D_{\Sigma} + GT_3)\omega = 0 \end{aligned} \right\}$$

де  $G_r$  і  $D_r$  – значення жорсткості і демпфування, що відповідають межі стійкості  $D_r = F(G_r)$ .

Знайдемо залежності граничних значень жорсткості і демпфування від частоти

$$\left. \begin{aligned} G_r(\omega) &= \frac{a_6\omega^4 - a_4\omega^2 + a_2}{k_0(1 - T_4^2\omega^2)}\omega^2; \\ D_{\Sigma r}(\omega) &= \frac{a_3 - a_5\omega^2}{k_0}\omega^2 - G_r(\omega)T_3. \end{aligned} \right\}$$

Для отримання рівняння та побудови межі стійкості необхідно виключити частоту з останнього рівняння. Розв'яжемо цю задачу графо-аналітичним методом.

Виділимо область стійкого керування, використовуючи правило нанесення штриховки. Для цього знайдемо визначник

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial X(G,D,\omega)}{\partial G} & \frac{\partial X(G,D,\omega)}{\partial D} \\ \frac{\partial Y(G,D,\omega)}{\partial G} & \frac{\partial Y(G,D,\omega)}{\partial D} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_0(1+T_4^2\omega^2) & 0 \\ k_0T_3\omega & k_0\omega \end{vmatrix} = k_0^2\omega(1+T_4^2\omega^2) > 0.$$

Оскільки визначник більше нуля, то штриховку наносимо з лівого боку, рухаючись за напрямом збільшення частоти  $\omega \rightarrow \max$ .

Отримані межа та область стійкості наведено на рис. 3.1.

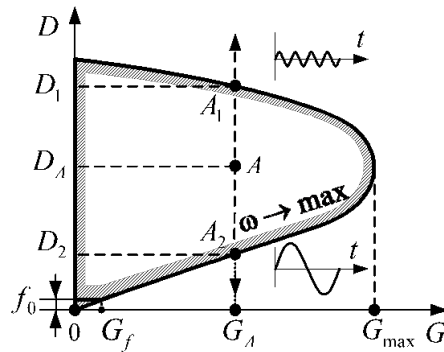


Рис. 3.1 Область стійкості системи стабілізації

Межа стійкості виділила на площині варійованих параметрів область стійкості. У середині цієї області будь-яка вибрана робоча точка  $A$ , з параметрами  $G_A$  і  $D_A$  відповідає затухаючим (стійким) процесам керування.

Діаграма якості (рис. 3.2) представить собою область стійкості з нанесеними на неї характерними лініями, що визначають показники якості системи у різних режимах роботи.

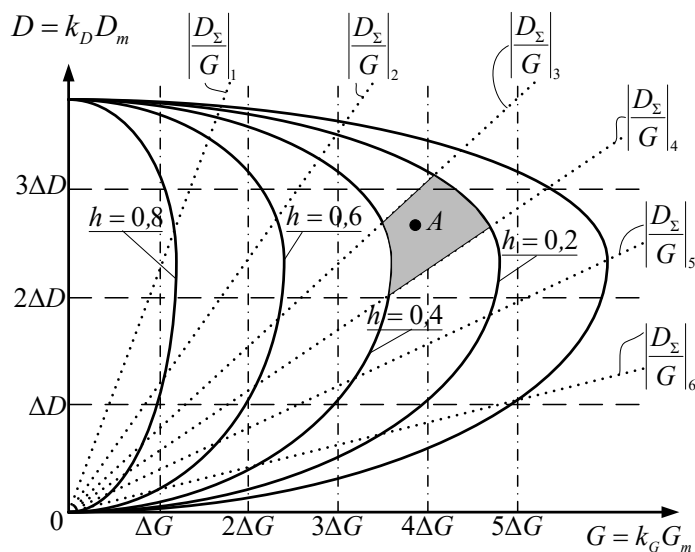


Рис. 3.2 Діаграма якості системи стабілізації

## Лінії рівної жорсткості

Лінії рівної жорсткості є прямі, паралельні осі ординат і проведені через рівні інтервали  $\Delta G$ . Коли робоча точка  $A$  переміщається лінією рівної жорсткості, то змінюється лише демпфування системи, а жорсткість залишається постійною.

Якщо технічними умовами задані, наприклад, мінімальне та максимальне значення експлуатаційної жорсткості, то прямі  $G_{\min} = \text{Const}$  і  $G_{\max} = \text{Const}$  виділяють з усієї області стійкості область  $G_{\min} \leq G \leq G_{\max}$ , усередині якої повинна бути робоча точка системи.

## Лінії рівного запасу стійкості

Величина першого перебігу  $\varphi_{0,1}$  і кількість перебігів  $n$ , що задаються ТУ, характеризують коливальність процесів регулювання, що залежить від запасу стійкості системи. Доцільно як загальний показник, що оцінює коливальність процесу регулювання, прийняти запас стійкості системи по модулю.

Відповідно до загального правила визначення запасу стійкості маємо

$$h = 1 - |U(\omega)|_{\text{при } V(\omega)=0},$$

де  $U(\omega)$ -дійсна, та  $V(\omega)$ -уявна частотні характеристики розімкненої системи.

Обчислюючи значення  $U(\omega)$  при  $V(\omega=0)$  для робочої точки  $A$  (для будь-якого регулювання системи), отримаємо

$$|U(\omega)|_{\text{при } V(\omega)=0} = \frac{G_A}{G_{Ag}}.$$

Отже,

$$h = 1 - |U(\omega)|_{\text{при } V(\omega)=0} = \frac{G_{Ag} - G_A}{G_{Ag}},$$

де  $G_A$  - жорсткість системи у вибраній робочій точці  $A$  з координатами  $D_A, G_A$ ;

$G_{Ag}$  - граничне значення жорсткості, яке може бути отримано в системі при  $D_A = \text{Const}$ .

При переміщенні робочої точки по лінії  $h = \text{Const}$  рівного запасу стійкості жорсткість і демпфування в системі змінюватимуться, а запас по модулю

залишається незмінним. Якщо значення  $h_{\min}$ , що характеризує коливальність системи, задано, то вимогі  $h \geq h_{\min}$  буде відповідати тільки та частина області стійкості, яка охоплена лінією  $h_{\min} = \text{Const}$ .

Лінії рівного ступеня демпфування  
(рівної помилки стеження)

Помилка стеження  $\theta_{\text{сл}}$  дорівнює швидкісної помилки, яка пропорційна швидкості стеження  $\Omega_0$  і визначається ступенем демпфування  $\frac{D}{G}$ .

Лінії рівного ступеня демпфування  $\frac{D}{G} = \text{Const}$  являють собою прями, проведені з початку координат площини  $D \rightarrow G$ . Тангенс кута  $\alpha$  нахилу кожної з цих прямих дорівнює певній величині "ступеня" демпфування  $\text{tg}\alpha = \frac{D}{G} = \text{Const}$ .

При переміщенні робочої точки А по лінії рівного ступеня демпфування сумарне демпфування та жорсткість системи змінюються, а їхнє відношення залишається постійним.

При заданій швидкості стеження можна для кожного значення ступеня демпфування визначити відповідну помилку стеження. Якщо задано, наприклад, максимально допустиме значення помилки стеження, то відповідне значення ступеня демпфування буде рівним

$$\left| \frac{D}{G} \right|_{\max} \cong \frac{\theta_{\text{сл max}}}{\Omega_{0 \max}} = \text{tg}\alpha_{\max},$$

де  $\Omega_{0 \max}$ -максимальна швидкість, задана технічними умовами.

За сукупністю розглянутих показників якості в області стійкості виявилася виділеною зона (заштрихована) оптимальних співвідношень жорсткості та демпфування, що відповідає необхідному рівню показників якості у сталих та перехідних режимах роботи системи.

Зміна жорсткості та демпфування з метою забезпечення необхідної ефективності системи може бути покладено в основу автоматизованого налаштування та діагностики систем стабілізації динамічних об'єктів.

Використання діаграми якості дозволяє вирішувати і обернену задачу - за сукупністю характерних ліній, що проходять через якусь точку області стійкості, оцінювати якість системи, як загалом, так і за окремими показниками, а при необхідності обґрунтовано ставити вимоги до систем стабілізації, забезпечуючи їх високу ефективність.

### 3.2 Структура модуля налаштування

З метою оптимізації на єдиній методологічній основі принципів налаштування та регулювання систем стабілізації рухомих об'єктів, підвищення достовірності одержуваних результатів та скорочення тимчасових та фінансових витрат на обслуговування може бути запропонований комп'ютерно-інтегрований комплекс з набором алгоритмів та програм визначення ступеня та оцінки запасів стійкості обслуговуваних систем, їх приватних та комплексних показників якості в усталених та перехідних режимах роботи.

Комплекс може бути виконаний як стаціонарна підсистема вбудованого контролю та налаштування систем стабілізації, так і у переносному варіанті. Основу його становить ЦВМ з базою даних за вихідними параметрами  $\Delta\varphi_0, \theta_{\text{сл}}, \varphi_{0.1}, n, t_o, t_p, h, \gamma, \Omega_0, \dots$  систем стабілізації рухомих об'єктів, які визначаються технічними умовами на виріб.

Вхідними параметрами комплексу є параметри вузлів та блоків конкретного зразка системи стабілізації:  $k_i$  – статичні передатні коефіцієнти (коефіцієнти посилення),  $T_i$  – постійні часу. Ці параметри можуть бути визначено відомими для різних об'єктів стабілізації методами.

Алгоритм роботи комплексу представлено на рис. 3.3.

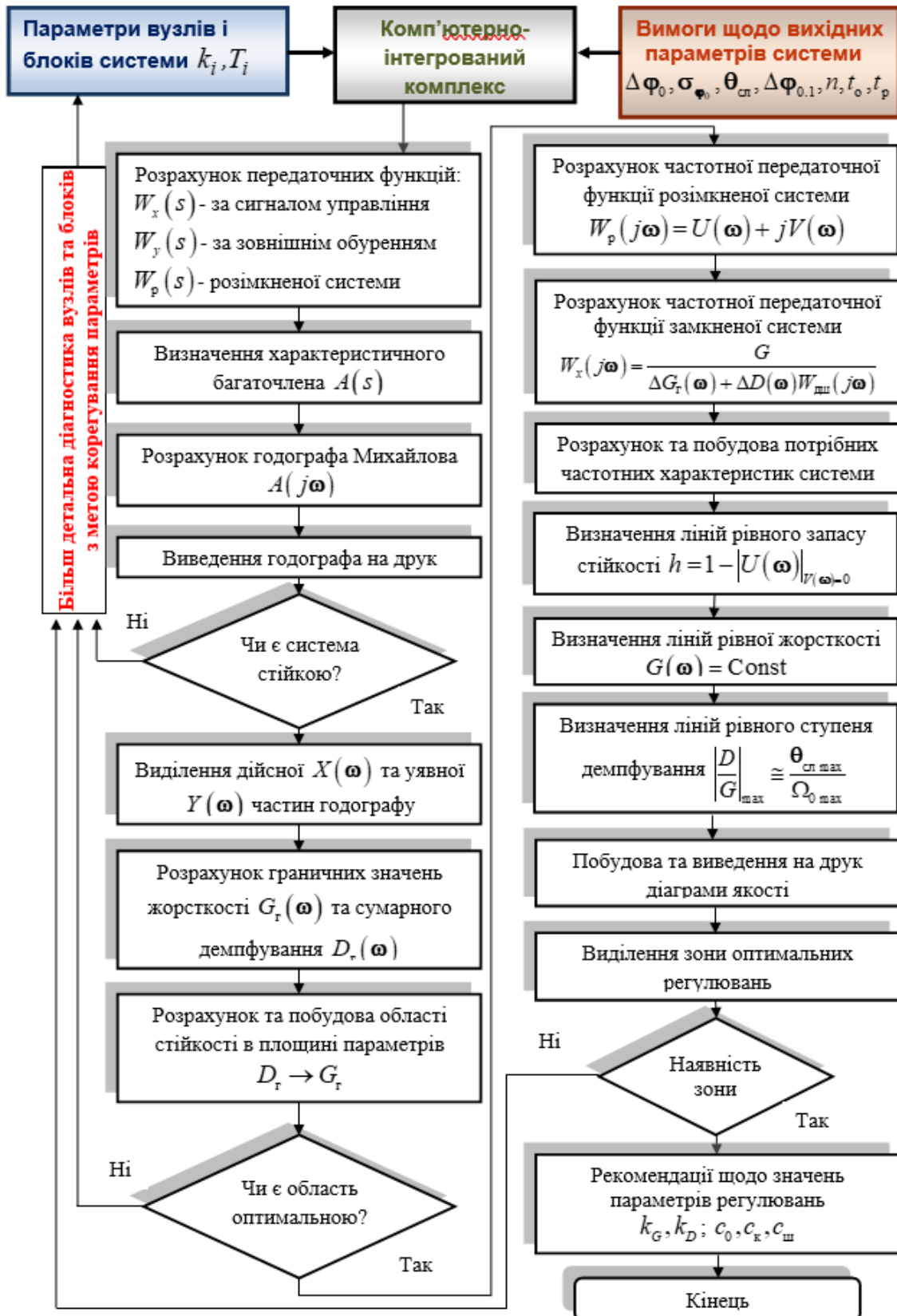


Рис. 3.3 Алгоритм роботи комплексу

### 3.3 Розрахункові алгоритми комплексу

Розглянемо основні етапи та математичне забезпечення вирішення поставленої задачі за допомогою пропонованого комп'ютерно-інтегрованого комплексу.

Визначення передатних функцій системи стабілізації

Відповідно до математичної моделі (структурної схеми) системи маємо:

- передатна функція по сигналу керування

$$W_x(s) = \frac{\varphi_0}{\varphi_3} = \frac{k_0 G (T_4^2 s^2 + T_3 s + 1)}{A(s)},$$

- передатна функція із зовнішнього збурення

$$W_y(s) = \frac{\varphi_0}{M_{y\Sigma}} = \frac{k_0 (T_4^2 s^2 + T_3 s + 1)(T_2^2 s^2 + T_1 s + 1)}{A(s)},$$

- передатна функція розімкнутої системи

$$W_p(s) = \frac{-\varphi_0}{\varphi_3} = \frac{k_0 G (T_4^2 s^2 + T_3 s + 1)}{G(s)}.$$

Визначення характеристичних багаточленів

$A(s)$  - характеристичний багаточлен замкнутої системи

$$A(s) = a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + (a_2 + k_0 G T_4^2) s^2 + k_0 (D + G T_3) s + k_0 G.$$

$G(s)$  - характеристичний багаточлен розімкнутої системи

$$G(s) = a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + k_0 D$$

Коефіцієнти характеристичних багаточленів визначаються параметрами системи стабілізації

$$\left. \begin{aligned} a_6 &= a'_3 T_4^2; \\ a_5 &= a'_3 T_3 + a'_2 T_2^4; \\ a_4 &= a'_3 + a'_2 T_3 + a'_1 T_4^2; \\ a_3 &= a'_2 + a'_1 T_3 + a'_0 T_4^2; \\ a_2 &= a'_1 + a'_0 T_3; \\ a_1 &= a'_0. \end{aligned} \right\}$$

Рівняння руху стабілізатора набуває вигляду

$$\Phi_0 = W_x(s)\Phi_3 + W_y(s)M_{y\Sigma}.$$

Розрахунок годографа Михайлова

$$A(j\omega) = [-a_6\omega^6 + a_4\omega^4 - (a_2 + k_0 G T_4^2)\omega^2 + k_0 G] + j[a_5\omega^4 - a_3\omega^2 + k_0(D + G T_3)]\omega.$$

Після перетворень маємо

$$A(j\omega) = [-a_6\omega^6 + a_4\omega^4 - (a_2 + k_0 G_r T_4^2)\omega^2 + k_0 G_r] + j[a_5\omega^5 - a_3\omega^2 + k_0(D_r + G T_3)\omega]$$

Виділення дійсної та уявної частин годографа  
годографа

$$\begin{aligned} X(\omega) &= -a_6\omega^6 + a_4\omega^4 - (a_2 + k_0 G_r T_4^2)\omega^2 + k_0 G_r \\ Y(\omega) &= a_5\omega^5 - a_3\omega^2 + k_0(D_r + G T_3)\omega \end{aligned}$$

Розрахунок граничних значень жорсткості та демпфування

$$\left. \begin{aligned} X(\omega) &= -a_6\omega^6 + a_4\omega^4 - [a_2 + k_0 G_r T_4^2]\omega^2 + k_0 G_r = 0 \\ Y(\omega) &= a_5\omega^5 - a_3\omega^3 + k_0(D_r + G T_3)\omega = 0 \end{aligned} \right\}$$

З першого рівняння системи визначаємо алгоритм розрахунку граничного значення жорсткості

$$G_r(\omega) = \frac{a_6\omega^4 - a_4\omega^2 + a_2}{k_0(1 - T_4^2\omega^2)}\omega^2.$$

Демпфування знаходиться з другого рівняння за наявності інформації про жорсткість

$$D_r(\omega) = \frac{a_3 - (a_3 T_4^2 + a_5 + a_2)\omega^2 + (a_5 T_4^2 + a_4)\omega^4 - a_6\omega^6}{k_0(1 - T_4^2\omega^2)}.$$



## Розрахунок перехідної характеристики

Відповідно до теореми розкладання маємо

$$H(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + C_3 e^{\lambda_3 t} + C_4 e^{\lambda_4 t} + C_5 e^{\lambda_5 t} + C_6 e^{\lambda_6 t} + k,$$

Тут  $\lambda_i$  - корені характеристичного рівняння

$$a_6 \lambda^6 + a_5 \lambda^5 + a_4 \lambda^4 + a_3 \lambda^3 + (a_2 + k_0 G T_4^2) \lambda^2 + k_0 (D + G T_3) \lambda + k_0 G = 0,$$

$C_i$  - постійні інтегрування.

Для інженерних розрахунків можемо обмежитися величинами першого порядку дрібниці (помилка не перевищить 10%). Тоді характеристичне рівняння набуде вигляду

$$(a_2 + k_0 G T_4^2) \lambda^2 + k_0 (D + G T_3) \lambda + k_0 G = 0.$$

Знаходимо його корені

$$\lambda_1 = \frac{-k_0 (D + G T_3) + \sqrt{k_0 G (2k_0 D T_3 - 4a_2 - 4k_0 G T_4^2) k_0^2 D^2 + G^2 T_3^2}}{2(a_2 + k_0 G T_4^2)},$$

$$\lambda_2 = \frac{-k_0 (D + G T_3) - \sqrt{k_0 G (2k_0 D T_3 - 4a_2 - 4k_0 G T_4^2) k_0^2 D^2 + G^2 T_3^2}}{2(a_2 + k_0 G T_4^2)}.$$

Вважаючи початкові умови нульовими, у загальному випадку маємо

$$\left. \begin{aligned} C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + k &= 0 \\ \lambda_1 C_1 + \lambda_2 C_2 + \lambda_3 C_3 + \lambda_4 C_4 + \lambda_5 C_5 + \lambda_6 C_6 &= 0 \\ \lambda_1^2 C_1 + \lambda_2^2 C_2 + \lambda_3^2 C_3 + \lambda_4^2 C_4 + \lambda_5^2 C_5 + \lambda_6^2 C_6 &= 0 \\ \lambda_1^3 C_1 + \lambda_2^3 C_2 + \lambda_3^3 C_3 + \lambda_4^3 C_4 + \lambda_5^3 C_5 + \lambda_6^3 C_6 &= 0 \\ \lambda_1^4 C_1 + \lambda_2^4 C_2 + \lambda_3^4 C_3 + \lambda_4^4 C_4 + \lambda_5^4 C_5 + \lambda_6^4 C_6 &= 0 \\ \lambda_1^5 C_1 + \lambda_2^5 C_2 + \lambda_3^5 C_3 + \lambda_4^5 C_4 + \lambda_5^5 C_5 + \lambda_6^5 C_6 &= 0 \\ \lambda_1^6 C_1 + \lambda_2^6 C_2 + \lambda_3^6 C_3 + \lambda_4^6 C_4 + \lambda_5^6 C_5 + \lambda_6^6 C_6 &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

Вирішуємо систему рівнянь та знаходимо постійні інтегрування

$$C_1 = \frac{\lambda_2 k}{\lambda_1 - \lambda_2}, \quad C_2 = \frac{-\lambda_1 k}{\lambda_1 - \lambda_2}, \dots, C_6.$$

Підставляємо отримані дані в рівняння перехідної характеристики та виводимо отриманий результат на графік. Варіанти можливих результатів наведено на рис. 3.4.

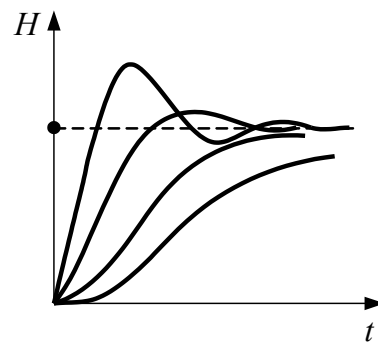


Рис. 3.4 Варіанти перехідних характеристик

Розрахунок та побудова області стійкості  
Методику побудови області стійкості надано на рис. 3.5.

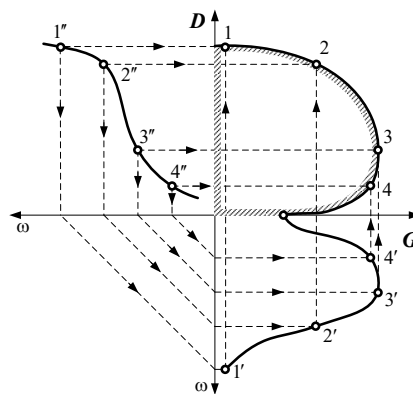


Рис. 3.5 Побудова області стійкості

Розрахунок частотної передатної функції розімкненої системи

Знаючи передатну функцію розімкненої системи, маємо

$$W_p(s) = \frac{k_0 G (T_4^2 s^2 + T_3 s + 1)}{a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + k_0 D}$$

Знаходимо її опис у частотній області

$$W_p(j\omega) = \frac{k_0 G (1 - T_4^2 \omega^2) + j k_0 G T_3 \omega}{(k_0 D - a_6 \omega^6 + a_4 \omega^4 - a_2 \omega^2) + j \omega (a_5 \omega^4 - a_3 \omega^2 + a_1)}$$

Позбавляємося ірраціональності у знаменнику та отримуємо

$$W_p(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega),$$

$$U(\omega) = \frac{k_0 G \left[ (1 - T_4^2 \omega^2) (k_0 D - a_6 \omega^6 + a_4 \omega^4 - a_2 \omega^2) + T_3 \omega^2 (a_5 \omega^4 - a_3 \omega^2 + a_1) \right]}{(k_0 D - a_6 \omega^6 + a_4 \omega^4 - a_2 \omega^2)^2 + \omega^2 (a_5 \omega^4 - a_3 \omega^2 + a_1)^2},$$

$$V(\omega) = \frac{\omega k_0 \left[ G (1 - T_4^2 \omega^2) (a_5 \omega^4 - a_3 \omega^2 + a_1) - G T_3 \omega (k_0 D - a_6 \omega^6 + a_4 \omega^4 - a_2 \omega^2) \right]}{(k_0 D - a_6 \omega^6 + a_4 \omega^4 - a_2 \omega^2)^2 + \omega^2 (a_5 \omega^4 - a_3 \omega^2 + a_1)^2}.$$

Рівняння дозволяють побудувати амплітудно-фазову частотну характеристику (АФЧХ) у разі зміни частоти вхідного сигналу від 0 до  $\infty$ .

Амплітуду і фазу вимушених коливань об'єкта керування визначимо як

$$Y_m(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}; \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}.$$

Визначення ліній рівного запасу стійкості  
Методику визначення запасів стійкості ілюструє рис. 3.6.

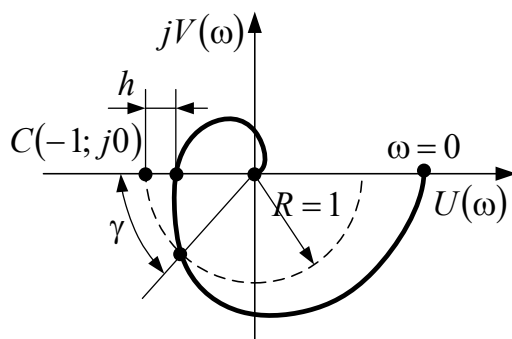


Рис. 3.6 Методика визначення запасів стійкості

Залишається перекласти методику на мову формул

$$h = 1 - |U(\omega)|_{V(\omega)=0}$$

$$V(\omega) = \frac{\omega k_0 \left[ G (1 - T_4^2 \omega^2) (a_5 \omega^4 - a_3 \omega^2 + a_1) - G T_3 \omega (k_0 D - a_6 \omega^6 + a_4 \omega^4 - a_2 \omega^2) \right]}{(k_0 D - a_6 \omega^6 + a_4 \omega^4 - a_2 \omega^2)^2 + \omega^2 (a_5 \omega^4 - a_3 \omega^2 + a_1)^2} = 0$$

$$\omega_1 = 0$$

$$\omega_{2,3} \approx \frac{k_0 DT_3 \pm \sqrt{(k_0 DT)^2 - 4a_1(a_1 T_4^2 - a_3)}}{2(a_1 T_4^2 - a_3)}$$

Визначення ліній рівної жорсткості

Визначення ліній рівного ступеня демпфування

Алгоритми характерних ліній області стійкості системи, що визначають якість процесів регулювання у різних режимах роботи, наведено у параграфі 3.1.

## РОЗДІЛ 4 НАЛАШТУВАННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ

### 4.1 Визначення адаптивності систем керування

Підвищення точності стабілізації динамічних об'єктів можна досягти застосуванням адаптивних систем стабілізації.

Адаптивними прийнято називати системи автоматичного керування, здатні пристосовуватися до зміни зовнішніх умов та властивостей об'єкта керування шляхом зміни структури та параметрів регулятора з метою забезпечення необхідної якості керування.

Прикладом зміни зовнішніх умов при експлуатації САУ можуть служити нестационарні випадкові впливи, що обурюють, ймовірнісні характеристики яких змінюються в вельми широких діапазонах.

Об'єктом керування зі змінними параметрами є літак, маса якого змінюється у міру витрати пального під час польоту.

Функціональну схему узагальненої адаптивної системи автоматичного керування відображено на рис. 4.1.

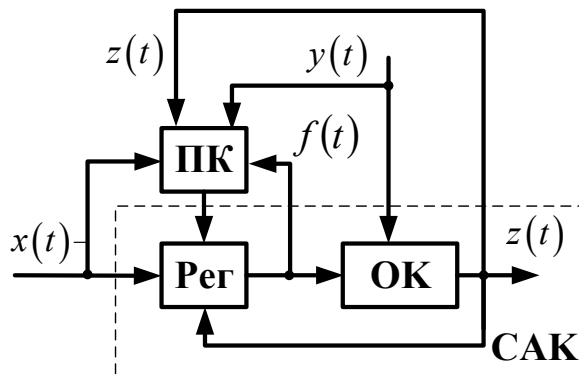


Рис. 4.1 Функціональна схема адаптивної системи

Система складається з двох контурів:

- Основний контур керування, у вигляді системи автоматичного керування (САК), до складу якого входять регулятор (Рег) та об'єкт керування (ОК), охоплені зворотнім зв'язком;

- Вторинний контур керування, представлений пристроєм керування автоматичною адаптацією (ПК), який отримує інформацію про сигнал керування  $x(t)$ , регульовану координату  $z(t)$  основної САК, сигнали регулятора  $f(t)$  і зовнішніх збурень  $y(t)$ , що діють на об'єкт керування.

Паралельно з тим, як САК вирішує свою основну задачу (наприклад стабілізацію ОК), пристрій керування автоматичною адаптацією виконує налаштування регулятора САК – відслідковує зміну умов функціонування системи і, за необхідності, змінює параметри або структуру регулятора задля забезпечення бажаної якості процесу управління.

Таким чином, контур адаптації утворює другий рівень керування – для нього основна САК виступає як об'єкт керування. Функціональну схему вторинного контуру адаптації наведено на рис. 4.2.

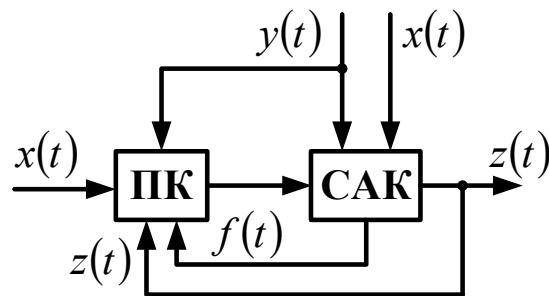


Рис. 4.2 Функціональна схема вторинного контуру адаптації

Адаптивна система, як основна, може бути виконана із розімкненим, замкнутим або комбінованим контурами адаптації.

Комбіновані контури є спільною реалізацією розімкнених і замкнутих контурів.

Структурну схему системи із розімкненим контуром адаптації по впливу, що обурюють зображено на рис. 4.3.

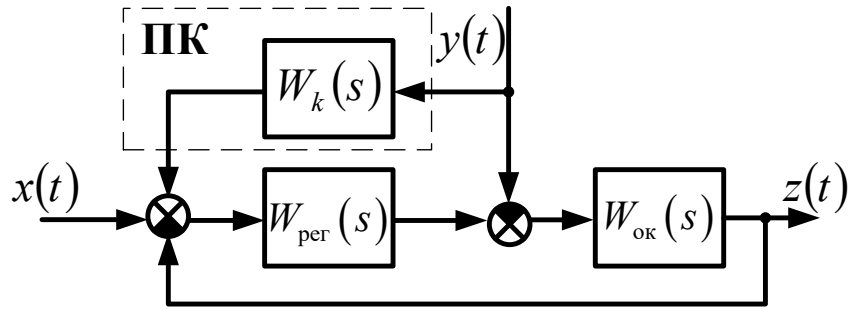


Рис. 4.3 Структурна схема САК із розімкненим контуром адаптації

Виходячи із структурної схеми, отримуємо рівняння руху системи:

$$z(t) = \frac{W_{\text{пер}}(s)W_{\text{ок}}(s)}{1 + W_{\text{пер}}(s)W_{\text{ок}}(s)}x(t) + \left( \frac{W_{\text{пер}}(s)W_k(s) - 1}{1 + W_{\text{пер}}(s)W_{\text{ок}}(s)} \right) W_{\text{ок}}(s)y, \quad (4.1)$$

де  $W_k(s)$  – передатна функція пристрою підсилення контуру адаптації.

Рівняння (4.1) приходить до вигляду

$$z(t) \approx \frac{W_{\text{пер}}(s)W_{\text{ок}}(s)}{1 + W_{\text{пер}}(s)W_{\text{ок}}(s)}x(t)$$

за дотримання умов

$$W_{\text{пер}}(s)W_k(s) = 1 \quad \text{або} \quad W_k(s) \approx \frac{1}{k_{\text{пер}}}$$

Таким чином, застосування контуру адаптації зводить до мінімуму вплив зовнішніх збурень на точність системи автоматичного керування.

Найчастіше замкнуті контури адаптації реалізуються за регульованою координатою САК. Як приклад на рис. 4.4 наведено структурну схему такої системи.

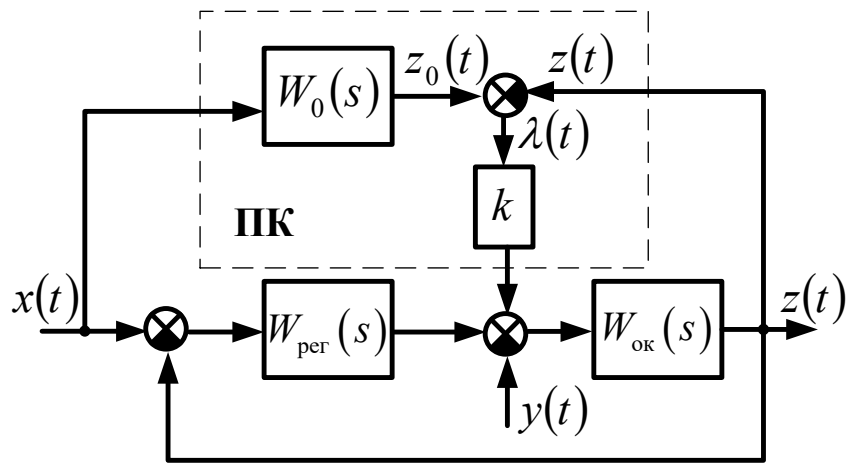


Рис. 4.4 Система із замкнутим контуром адаптації

Пристрій керування ПК контуру адаптації включає в себе еталонний фільтр з передатною функцією  $W_0(s)$  рівній бажаній передатній функції основної САК, пристрій порівняння (суматор) регульованої координати  $z(t)$  з вихідною величиною  $z_0(t)$  еталона і підсилювач з коефіцієнтом посилення  $k$ .

Регулятор має передатну функцію  $W_{\text{пер}}(s)$ . Об'єкт керування  $W_{\text{ок}}(s)$  піддається впливу зовнішніх збурень  $y(t)$ . Сигнал  $\lambda(t)$  розузгодження регульованої координати і еталона після посилення надходить на об'єкт керування  $W_{\text{ок}}(s)$ .

Після еквівалентних перетворень структурної схеми знаходимо передатні функції системи

по сигналу керування

$$W_x(s) = \frac{W_{\text{пер}}(s) + kW_0(s)}{1 + W_{\text{пер}}(s)W_{\text{ок}}(s) + kW_{\text{ок}}(s)} W_{\text{ок}}(s), \quad (4.2)$$

по збурюючому впливу

$$W_y(s) = \frac{W_{\text{ок}}(s)}{1 + W_{\text{пер}}(s)W_{\text{ок}}(s) + kW_{\text{ок}}(s)}. \quad (4.3)$$



Обираючи достатньо високий коефіцієнт підсилення  $k = k_m$ , тобто забезпечуючи умови  $k_m W_{ок}(s) \gg 1 + W_{пер}(s)W_{ок}(s)$  і  $\frac{1}{k_m} \rightarrow 0$ , знаходимо рівняння адаптивної системи

$$z(t) \approx W_0(s)x(t) - \frac{1}{k_m}y(t) \approx W_0(s)x(t). \quad (4.4)$$

Таким чином, попри зміну зовнішніх впливів, що діють на систему, регульована координата залишається близькою до еталонної.

Зауважимо, що рівень якості керування САК визначається максимумом або мінімумом обраного критерію  $J$  його оцінки, котрий може залежати від вхідних впливів  $f(t)$  об'єкта керування, параметрів  $a_j$  налаштування регулятора САК, часу  $t$ , тощо

Введемо узагальнене позначення  $\mu \equiv f; a_j; t$  для змінних параметрів системи автоматичного керування. Рис. 4.5 відображає можливі характеристики  $J = f(\mu)$

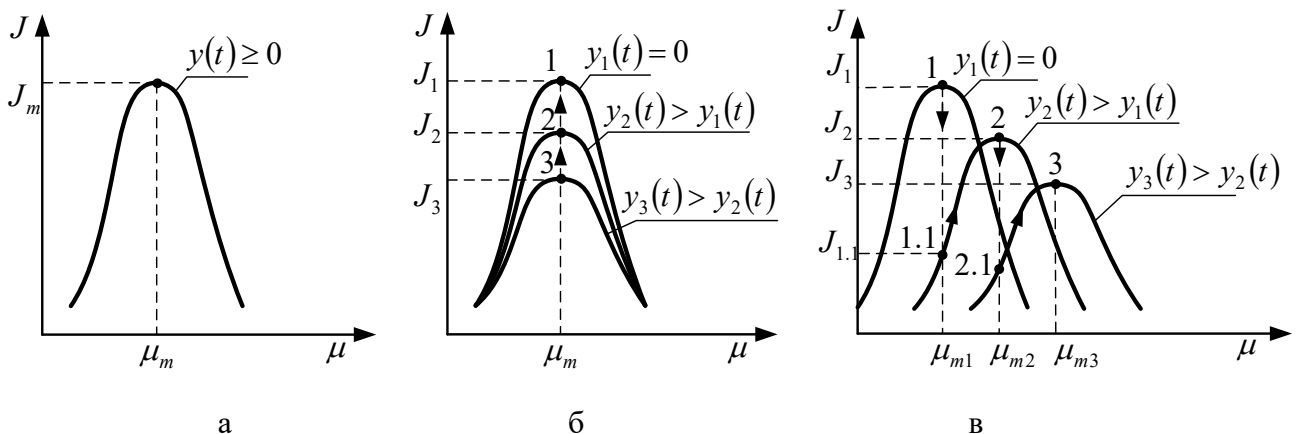


Рис. 4.5 Характеристики САК:

а – без зсуву; б – зсув по вертикалі; в – зсув по горизонталі

Якщо екстремум критерія якості (рис. 4.5,а) постійний ( $J_m = \text{Const}$ ), і відповідає певному значенню  $\mu_m = \text{Const}$  варійованого параметра при зміні збурюючих впливів  $y \geq 0$  у всьому можливому діапазоні, то використання адаптивних систем буде недоцільним, оскільки задачу підтримки заданої якості

керування  $J_m$  із необхідною точністю здатна вирішити звичайна САК при забезпеченні попереднього налаштування  $\mu_m$ .

Якщо екстремум критерію якості відповідає постійному значенню  $\mu_m = \text{Const}$ , але змінює свої рівні  $J_3 < J_2 < J_1$  при зміні збурюючих впливів  $y_3(t) > y_2(t) > y_1(t)$  (рис. 4.5,б), доцільним буде використання адаптивних систем зі стабілізацією якості керування. Завдання вирішується використанням адаптивної системи (рис. 4.4) з еталонним фільтром.

Рис. 4.5,в відповідає випадку, коли при зміні впливів збурення  $y_3(t) > y_2(t) > y_1(t)$  екстремуми якості змінюються як за рівнем  $J_3 < J_2 < J_1$ , так і за напрямком, тобто відповідають різним значенням варійованого параметру системи  $\mu_{m3} > \mu_{m2} > \mu_{m1}$ . В таких умовах використовують адаптивні системи з оптимізацією якості управління, також відомі в спеціальній літературі як системи екстремального управління (СЕК).

## 4.2 Експериментальні дослідження адаптивних систем

Планом експерименту передбачалося:

- побудова в середовищі MatLab на основі пакету прикладних програм Simulink 4 моделей систем стабілізації класичного виконання та адаптивних із розімкненим та замкнутим контурами адаптації;
- дослідження показників якості систем в усталених та перехідних режимах роботи в залежності від співвідношення експлуатаційної жорсткості та експлуатаційного демпфування;
- дослідження впливу експлуатаційної жорсткості та експлуатаційного демпфування на динаміку зміни похибок систем стабілізації при дії випадкових збурюючих впливів;

- порівняльний аналіз систем стабілізації та вироблення рекомендацій щодо застосування адаптивних систем.

Математична модель (структурна схема) системи стабілізації, отримана в розділі 1, з достатнім для інженерних розрахунків ступенем точності описує роботу системи та дозволяє проводити її всебічне дослідження.

Вивчення та узагальнення матеріалів літературних джерел дозволили прийняти наступні значення коефіцієнтів моделі системи стабілізації:

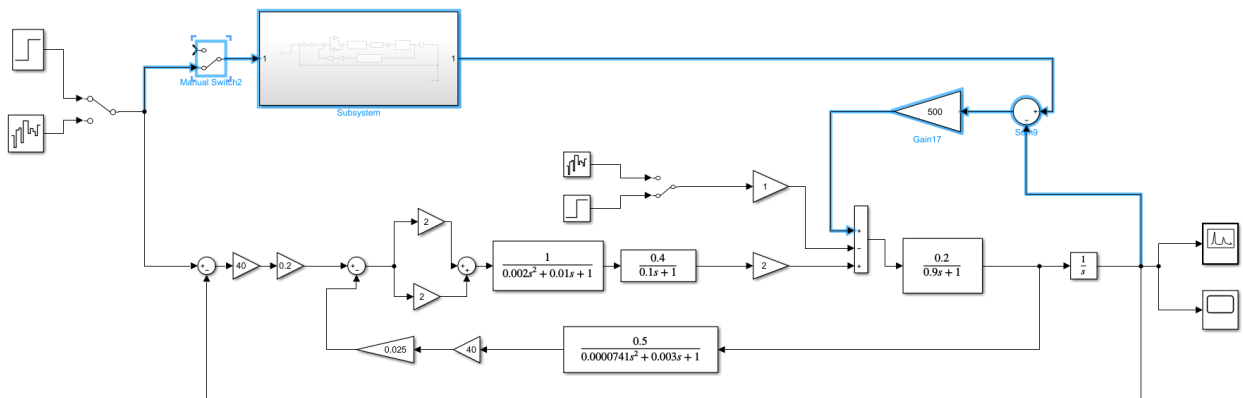
$$k_1^{\text{еп}} = k_2^{\text{еп}} = 2, k_{\text{отк}} = 40, k_{\text{отш}} = 40, c_k = 0,2, c_{\text{ш}} = 0,2, c_0 = 1, \frac{k_0}{T_0s + 1} = \frac{0,2}{0,9s + 1};$$

$$W_{\text{вп}}(s) = \frac{k_{\text{вп}}}{T_{\text{вп}}s + 1} = \frac{0,4}{0,1s + 1}, \frac{H/C_T}{T_4^2s^2 + T_3s + 1} = \frac{0,5}{0,0000741s^2 + 0,003s + 1};$$

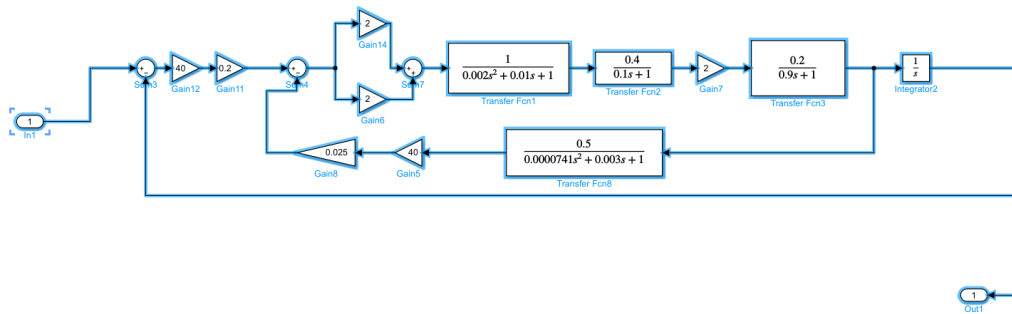
$$\frac{k_M}{T_2^2s^2 + T_1s + 1} = \frac{2}{0,002s^2 + 0,01s + 1}.$$

У відповідності до отриманої структурної схеми, в середовищі MatLab була побудована модель системи стабілізації із замкнутим контуром адаптації. Модель подано на рис. 4.6,а.

Эталонный фильтр на модели показан как Subsystem. Его содержимое раскрыто на рис. 4.6,б.



а



б

Рис. 4.6 Модель системи стабілізації:

а – із замкнутим контуром адаптації; б – еталонний фільтр

У ході проведення експерименту ключами перемикання Manual switch забезпечувалась можливість організації моделі системи стабілізації як класичного виконання, так і адаптивного.

Формування відповідних входних впливів забезпечувалося моделями джерел сигналів Step, White Noise. Вихідні сигнали реєструвалися моделями осцилографа Scope і спектрометра Power Spectral Density. Застосовувався апарат лінійного аналізу MathLab.

Як критерії порівняння використовувалися критерії стійкості автоматичних систем, критерії оцінки якості в сталих і перехідних режимах роботи, критерії оцінки якості при дії випадкових збурюючих впливів.

Модель системи стабілізації з розімкненим контуром адаптації представлена на рис. 4.7.

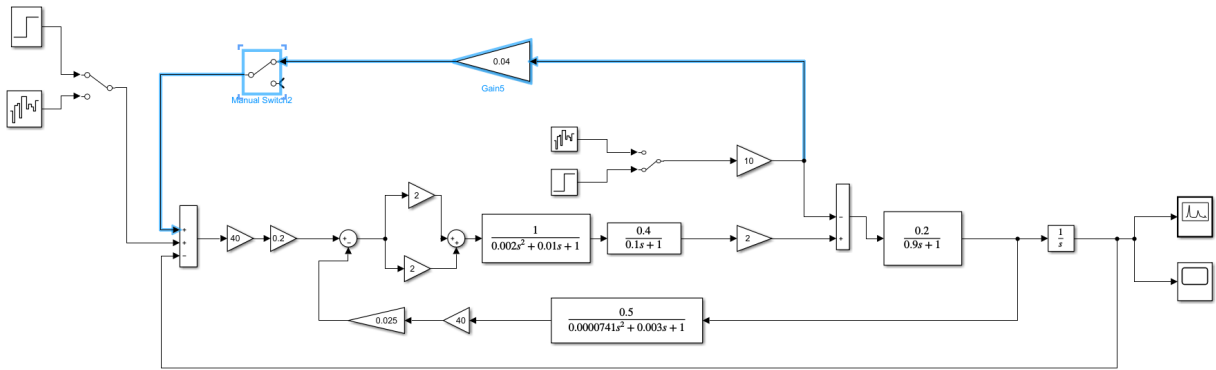


Рис. 4.7 Модель з розімкненим контуром адаптації

Матеріали обробки експериментів наведено на рис. 4.8 – 4.10. Їх попередній аналіз підтверджує доцільність використання в системах стабілізації контурів адаптації.

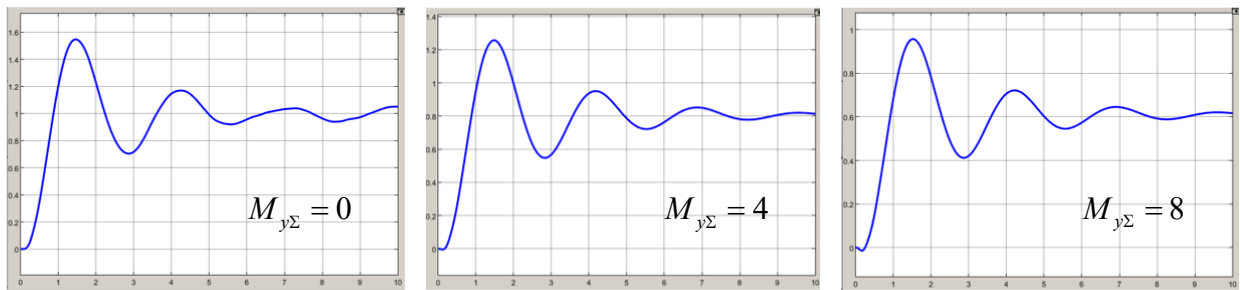


Рис. 4.8 Перехідні характеристики класичної системи

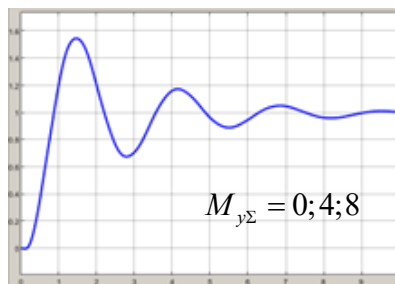


Рис. 4.9 Перехідні характеристики адаптивної системи

Рис. 4.8 – 4.9 ілюструють вплив зовнішніх збурень на усталені значення вихідного сигналу системи стабілізації.

Порівнюючи між собою перехідні процеси класичної системи (рис. 4.8), бачимо, що зі збільшенням зовнішнього збурення значення вихідного стгнала системи зменшується. Отже, зростає абсолютна помилка системи. Вихідний сигнал адаптивної системи (рис. 4.9) при всіх значеннях зовнішнього збурення практично залишається без змін і визначається тільки рівнем сигналу керування.

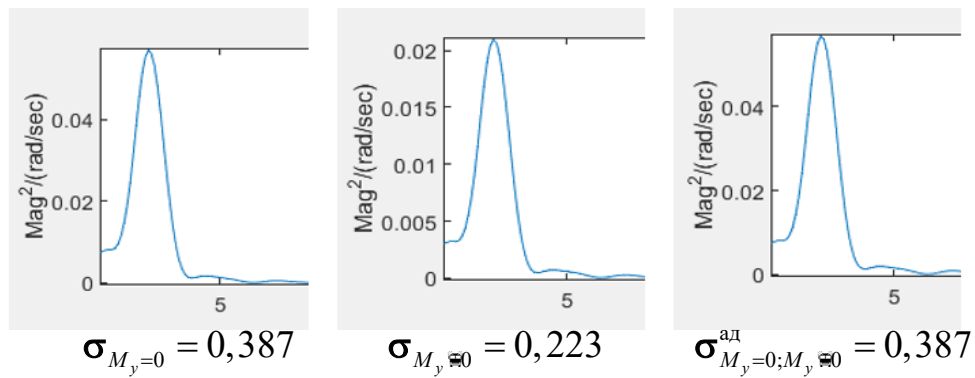


Рис. 4.10 Спектральні щільності вихідного сигналу

Цей висновок підтверджує і аналіз реакції системи стабілізації на випадкові збурюючі впливи (рис. 4.10). Середньоквадратичне значення вихідного сигналу адаптивної системи залежить тільки від рівня сигналу керування, тобто точність її істотно вище за систему класичної.

Подані висновки повністю піддають і результати експерименту із системою стабілізації (рис. 4.7), яка має у своєму складі розімкнений контур адаптації. Правда для того, щоб отримати такі дані, необхідно за допомогою датчика збурень фіксувати всі абсолютно зовнішні збурення. На практиці це зробити неможливо. Тому керування ведеться за основним збуренням, що викликає найбільші відхилення керованої величини від її заданого значення. Функціональну схему адаптивної системи за збуренням показано на рис. 4.11.

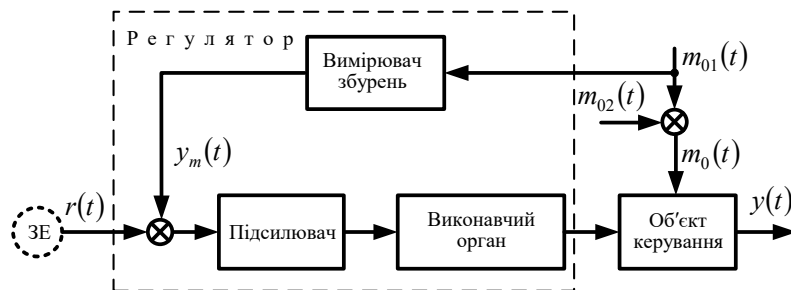


Рис. 4.11 Функціональна схема адаптивної системи за збуренням

Таке зовнішнє збурення визначається, як правило, експериментально, виходячи з умов можливого функціонування системи, на основі аналізу залежностей між керованою величиною й зовнішніми збуреннями. Налаштування параметрів

виконавчого органа регулятора може проводитися за нульового або номінального значення зовнішнього збурення.

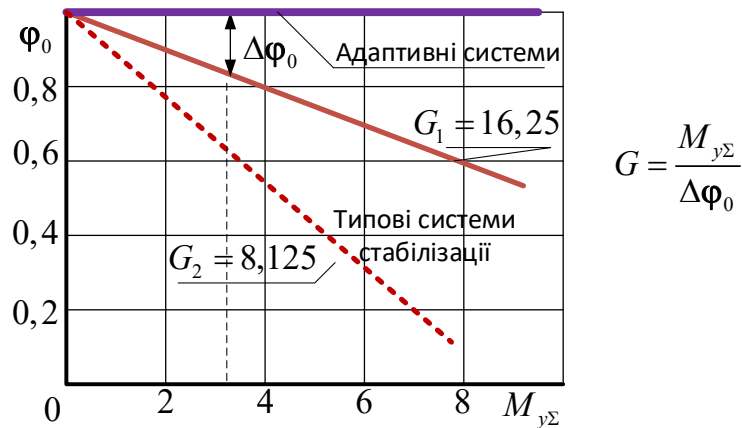


Рис. 4.12 Навантажувальні характеристики

На рис. 4.12 наведено навантажувальні характеристики систем стабілізації. Аналіз останніх показав, що класичні системи стабілізації являються статичними системами, т.е. мають абсолютну статичну погрешність  $\Delta\Phi_0$  (ошибку). Данна погрешність залежить від жорсткості  $G$  системи

$$\Delta\Phi_0 = \frac{M_{y\Sigma}}{G}.$$

В адаптивних системах стабілізації абсолютну статичну погрешність відсутнє – це системи астатичні.

Вплив експлуатаційних регулювань на якість та динаміку поведінки систем стабілізації був присвячений останній етап експеримента.

Його результати ілюструють рис. 4.13 – 4.17.

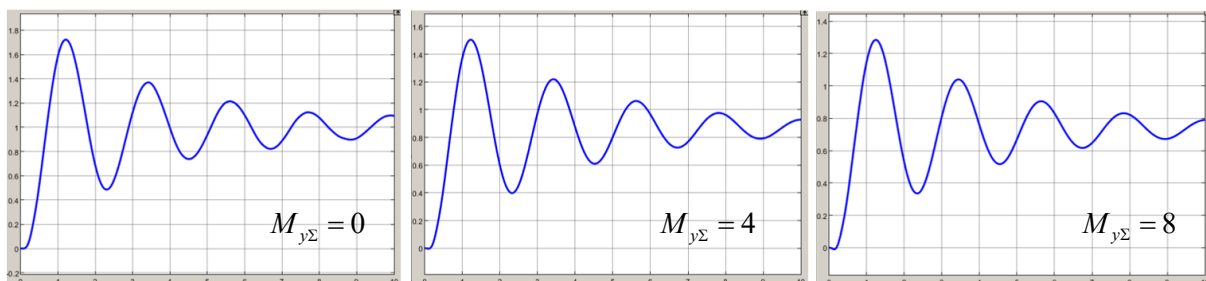


Рис. 4.13 Перехідні характеристики класичної системи  $G > G_{\text{опт}}$

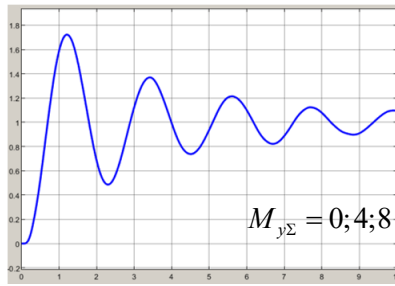


Рис. 4.14 Перехідні характеристики адаптивної системи  $G > G_{\text{опт}}$

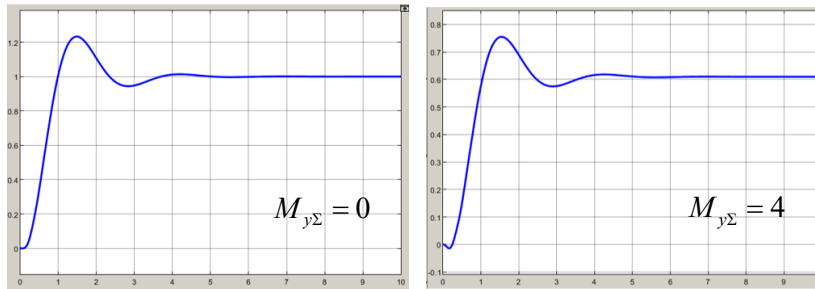


Рис. 4.15 Перехідні характеристики класичної системи  $D > D_{\text{опт}}$

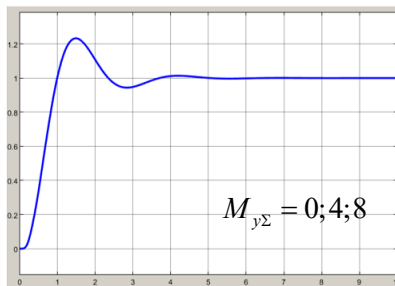


Рис. 4.16 Перехідні характеристики адаптивної системи  $D > D_{\text{опт}}$

Аналіз отриманих результатів показує, що зміни жорсткості та демпфування систем стабілізації призводить до суттєвих змін показників їхньої якості. Теж відбувається і в адаптивних системах. Разом з тим вихідний сигнал адаптивної системи при всіх значеннях зовнішнього збурення практично буде залишатися без змін і визначатися тільки рівнем сигналу керування.

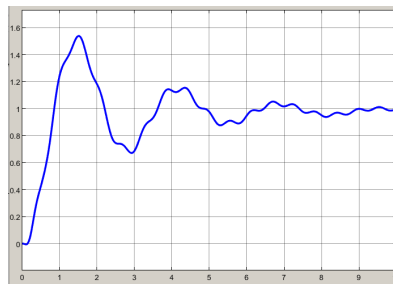


Рис. 4.17 Перехідні характеристики адаптивної системи



$$k_G^{\text{системи}} = 0,5; k_G^{\text{фільтра}} = 0,2$$

На рис. 4.17 наведено перехідну характеристику адаптивної системи при розбіжності параметра  $k_G^{\text{системи}} = 0,5; k_G^{\text{фільтра}} = 0,2$  налаштування фільтра та системи стабілізації. Спостерігаємо появу перешкод у роботі адаптивної системи. Робимо висновок про необхідність підтримки експлуатаційних параметрів – жорсткості та демпфування на значеннях близьких до оптимальних. Для цього потрібний періодичний контроль адаптивних систем під час експлуатації.

Таким чином, матеріали експерименту підтверджують принципову можливість застосування на практиці з метою забезпечення високої точності адаптивних систем стабілізації.

### 4.3 Спосіб експлуатаційних регулювань

Зміна жорсткості й демпфування з метою забезпечення необхідної ефективності адаптивних систем стабілізації може бути покладена в основу їхніх експлуатаційних регулювань.

Аналіз структурної схеми системи стабілізації показує, що стабілізуючий момент можна представити у вигляді векторної суми двох складових

$$\bar{M}_c = \bar{M}_G + \bar{M}_D = k_G G_m U_\kappa + k_D D_m U_\omega, \quad (4.5)$$

де  $M_G = k_G G_m U_\kappa$  - складова, пропорційна жорсткості системи;

$M_D = k_D D_m U_\omega$  - складова, пропорційна демпфуванню системи.

Для зміни цих параметрів в системах існують контури підсумовування. У загальному випадку контур підсумовування може об'єднувати три регулюючі елементи. Позначимо їх передатні коефіцієнти:

$0 < c_\kappa < 1$  - передатний коефіцієнт елемента, що регулює сигнал датчика кута;

$0 < c_\omega < 1$  - передатний коефіцієнт елемента, що регулює сигнал датчика швидкості;

$0 < c_0 < 1$  - передатний коефіцієнт елемента, що регулює загальний сигнал.

У цьому випадку рівняння (4.5) набуває вигляду

$$\bar{M}_c = \bar{M}_G + \bar{M}_D = c_k c_0 G_m U_k + c_{ш} c_0 D_m U_{ш} = c_k c_0 M_{Gm} + c_{ш} c_0 M_{Dm}.$$

На практиці контури підсумовування виконуються як на резисторах, так і на підсумкових підсилювачах. У принципі при настройці можна задіяти всі три регулюючих елемента. Однак з метою спрощення технології налаштування адаптивних систем стабілізації автором запропоновано налаштування з використанням одного регульованого потенціометра.

В цьому разі контур підсумовування може бути виконаний за схемою, що наведено на рис. 4.18.

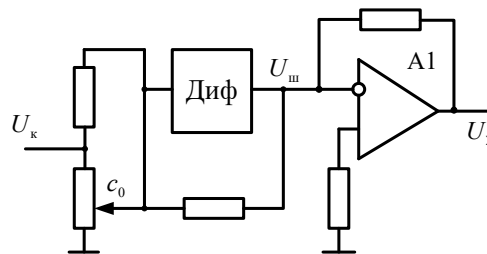


Рис. 4.18 Контур підсумовування

Розглянемо можливості цього контуру

Датчики кута й швидкості неминуче мають власні помилки. Заміна одного з датчиків інтегральною статичною схемою дозволяє підвищити точність системи в цілому. Наприклад, сигнал, пропорційний швидкості відхилення об'єкта керування, може бути отриманий диференціюванням сигналу датчика відхилення. Підсумовуючи сигнал датчика кута  $U_k$  й отриманий диференціюванням сигнал  $U_{ш}$ , пропорційний швидкості, маємо класичний сумарний сигнал  $U_{\Sigma}$  формування стабілізуючого моменту.

Знайдемо сигнал на виході контуру підсумовування

$$U_{\Sigma} = c_0 U_k + s(U_k + c_0 U_k) = c_0 U_k + (1 + c_0) U_{ш} = c_0 (U_k + U_{ш}) + U_{ш}, \quad \text{де } U_{ш} = s U_k.$$

Отже, переміщенням потенціометра  $c_0$  одночасно можна регулювати й амплітуду й фазу стабілізуючого моменту одночасно

$$M_c = \sqrt{c_0^2 M_{Gm}^2 + (1+c_0)^2 M_{Dm}^2} \approx \sqrt{c_0^2 M_{Gm}^2 + c_0^2 M_{Dm}^2 + M_{Dm}^2} = \sqrt{c_0^2 M_{Cm}^2 + M_{Dm}^2};$$

$$\psi = \arctg \frac{(1+c_0)M_{Dm}}{c_0 M_{Gm}} = \begin{cases} \arctg \frac{2M_{Dm}}{M_{Gm}} \Big|_{c_0=1} & = \psi_m \\ \arctg \frac{M_{Dm}}{0} \Big|_{c_0=0} & = \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

Векторну діаграму контуру наведено на рис.4.19.

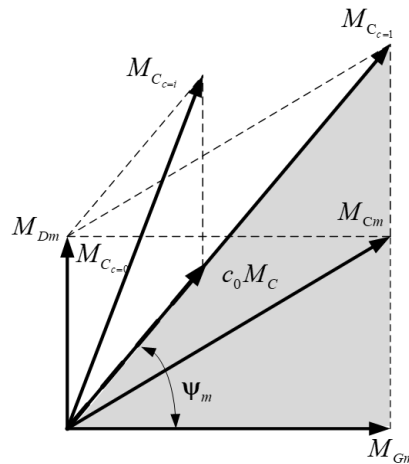


Рис. 4.19 Векторна діаграма контуру

Її аналіз показує, що контур  $c_0$  дозволяє змінювати амплітуду стабілізуючого моменту від значення  $M_c = M_{C_{c=1}}$  при  $c_0 = 0$  до значення  $M_c = M_{Dm}$  при  $c_0 = 0$ . При цьому діапазон зміни фази складе  $\psi_m - 90^\circ$ .

Таким чином, якщо взяти до уваги підвищення точності систем при використанні контуру  $c_0$  й простоту настроювання системи, то переваги даного контуру цілком очевидні.

Розглянуті можливості контуру підсумовування може бути покладене в основу методики отримання бажаних регулювань за заданими значеннями непрямих показників якості систем стабілізації. Основними контрольованими параметрами систем розглядатимемо жорсткість і демпфування. Методи їх визначення задаються у кожній галузі розробником систем та викладаються в інструкціях з експлуатації.

Регулювання системи, що має у своєму складі контур підсумовування  $c_0$  може виконуватися як показано на рис. 4.20.

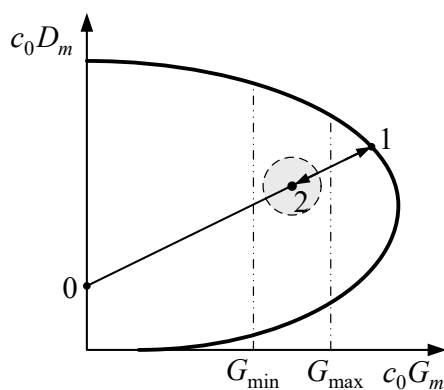


Рис. 4.20 Спосіб експлуатаційних регулювань

Виходячи з вищевикладеного, зазначимо, що необхідна якість функціонування адаптивних систем стабілізації може бути забезпечена шляхом варіювання їх основних параметрів – жорсткості та демпфування. Завдання налаштування та регулювання систем вирішується зміною названих параметрів за допомогою потенціометрів контурів підсумовування. Розглянутий спосіб експлуатаційних регулювань прост та не потребує високої кваліфікації оператора.

## ВИСНОВКИ

✓ Параметрична невизначеність систем стабілізації обумовлена змінами параметрів регулятора або об'єкта керування у процесі експлуатації. Структурна – точністю моделювання системи, і насамперед точністю моделі об'єкта керування.

✓ За сукупністю розглянутих показників якості систем стабілізації в області її стійкості виявилася виділеною зона оптимальних співвідношень жорсткості та демпфування, що відповідає необхідному рівню показників якості у сталих та перехідних режимах роботи системи.

✓ З метою оптимізації на єдиній методологічній основі принципів налаштування та регулювання систем стабілізації рухомих об'єктів, підвищення достовірності одержуваних результатів та скорочення тимчасових та фінансових витрат на обслуговування був запропонований комп'ютерно-інтегрований комплекс з набором алгоритмів та програм визначення ступеня та оцінки запасів стійкості обслуговуваних систем, їх приватних та комплексних показників якості в усталених та перехідних режимах роботи.

✓ Якщо екстремум критерію якості відповідає постійному значенню, але змінює свої рівні при зміні збурюючих впливів, доцільним буде використання адаптивних систем зі стабілізацією якості керування. Завдання вирішується використанням адаптивної системи з еталонним фільтром.

✓ По своїх характеристиках запропонований контур налаштування дозволяє вибрати таке сполучення регульованих параметрів, при яких діючі на систему збурювання компенсуються стабілізуючим моментом «у середньому», тобто так, щоб середнє (середньоквадратичне або середньамплітудне) значення помилки не виходило за межі заданої технічними умовами точності.

✓ Контур підсумовування  $c_0$  забезпечує достатній діапазон регулювання амплітуди й фази стабілізуючого моменту.

✓ Розглянутий спосіб експлуатаційних регулювань простий та не потребує високої кваліфікації оператора..

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аблесімов О.К. Теорія автоматичного керування. - К.: Освіта України, 2019. – 270 с.
2. Аблесімов О.К., Александров Є.Є., Александрова І.Є. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. - Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 443 с.
3. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І. Теорія автоматичного управління. - К: Техніка, 2002. - 688с.
4. Аблесімов О.К. Теорія автоматичного керування. Лабораторний практикум.– К.: Принт-центр, 2013. – 120с.
5. Ч.Филлипс, Р. Харбор Системы управления с обратной связью. – ЛБЗ, 2001. - 615с.
- 6 . Р. Дорф, Р. Бишоп Современные системы управления. - ЛБЗ, 2004. - 832с.
7. Сільвестров А.М. Островерхов М.Я., Шефер О.В., Ладік Н.А., Зіменков Д.К. Системи автоматичного керування технологічними комплексами: навчальний посібник. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. – 466 с.