

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.
_____ 2023р.



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО-КВАЛІФІКАЦІЙНОГО РІВНЯ
“БАКАЛАВР”

Тема: АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ПРИЛАДНИХ
СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ АВІАЦІЙНОЇ АВТОМАТИКИ

Виконавець:

Духота І.Д.

Керівник: ктн, професор



Аблесімов О.К.

Нормоконтролер: к.т.н., професор



Філяшкін М.К.

Київ 2023

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.

“ ”  2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи студенту

Духоті І.Д.

Тема роботи: “ Автоматизація проектування приладних слідкуючих систем авіаційної автоматики”

1. Термін виконання проекту (роботи): з « 01 » 04 2023р по «25» 06 2023р.

2. Вихідні данні до роботи: технічні параметри синхронно-слідкуючих систем передачі кута виконаних на сельсинах, а також на СКВТ.

3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):

1.Області застосування та функціональний склад слідкуючих систем. 2.Якість ПСС у сталих режимах роботи. 3.Якість ПСС в перехідних режимах роботи. 3.Аналіз схемних рішень базових ПСС . 4.Математичне моделювання слідкуючих систем. 5.Структурний аналіз систем. 6.Аналітичне конструювання слідкуючих систем. 7.Алгоритм автоматизації проектування. 8.Розробка програмно-методичного забезпечення аналізу та синтезу ПСС. 9.Моделювання на основі пакетів прикладних програм.

4. Перелік обов'язкового графічного матеріалу: 1.Структурні схеми ПСС ЛА. 2.Модель розрахунку статичних та динамічних характеристик сімейства ПСС. 3.Перехідні і частотні характеристики. 4.Алгоритмічне та програмне забезпечення. 5.Програмне забезпечення розрахунку імовірнісних характеристик.

5. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	ПІДБІР ЛІТЕРАТУРИ	01.04-10.04	
2	ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ	11.04-12.04	
3	ОБГРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПРИЛАДНИХ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ НА СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ	13.04-20.04	
4	МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ПРИЛАДНИХ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ	21.04-31.04	
5	МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ	01.05-10.05	
6	ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ	11.05-19.05	
7	РОЗРОБКА ПРЕЗЕНТАЦІЇ	20.05-23.05	
8	ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ	24.05- 26.05	

6. Дата видачі завдання _____

Керівник: професор _____ Аблесімов О.К.
(підпис)

Завдання прийняв до виконання _____ Духота І.Д.

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи “ Автоматизація проектування приладних слідкуючих систем авіаційної автоматики”: стор. - _____, рис. - _____, табл. _____, використаних джерел – _____.

СЛІДКУЮЧА СИСТЕМА, СЕЛЬСИН, ОБЕРТОВИЙ ТРАНСФОРМАТОР, ПЕРЕДАТНА ФУНКЦІЯ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ.

Об’єкт дослідження – автоматизоване проектування приладних слідкуючих систем.

Мета роботи – Розробка математичного та програмного забезпечення автоматизованого проектування приладних слідкуючих систем.

Метод дослідження – структурно-параметричний аналіз.

Робота присвячена слідкуючим системам, які знайшли широке застосування в системах керування літальними апаратами. Їхній функціональний склад і області застосування досить різноманітні. Разом з тим, якість функціонування САУ буде тим краще, чим точніше визначені параметри ПСС ЛА. У цьому зв'язку, актуальними є напрямки робіт з алгоритмічного і програмного забезпечення розрахунків ПСС літальних апаратів.

Важливість програмного забезпечення стає очевидною з того факту, що вартість розробки, за оцінками різних авторів, на порядок і більше перевищує вартість апаратури ЕОМ, для якої це забезпечення призначене.

У ході роботи приведено класифікацію слідкуючих систем; поставлені задачі алгоритмічного та програмного забезпечення автоматизованого синтезу; приведені структурні схеми базови ПСС та досліджена якість їх роботи; здійснене моделювання на основі пакетів прикладних програм. Запропонована модель двоканальної ПСС та розроблене програмне забезпечення автоматизованого синтезу ПСС методом стандартний перехідних характеристик.

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ЛА – літальний апарат;

СС – слідкуюча система;

ПСС – приладна слідкуюча система;

САУ – система автоматичного управління;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

ЛАЧХ – логарифмічна амплітудно-фазова характеристика;

ММ – математична модель;

ЗМЗ – загальне математичне забезпечення;

СМЗ – спеціальне математичне забезпечення;

ППП – пакет прикладних програм;

СКОТ – синусно-косинусний обертовий трансформатор;

СД – сельсин-датчик;

СП – сельсин-приймач;

СТ – сельсин-трансформатор;

ВД – виконавчий двигун;

ПС – підсилювач;

ФІ – фазоінвертор;

РЕД – редуктор.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
1. ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ.....	
1.1 Області застосування та функціональний склад слідкуючих систем .	
1.2 Завдання автоматизованого проектування	
1.3 Мета та завдання роботи	
2. ОБГРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПРИЛАДНИХ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ НА СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ.....	
2.1 Якість ПСС у сталих режимах роботи.....	
2.2 Якість ПСС в перехідних режимах роботи.....	
2.3 Якість за комплексними критеріями.....	
3. МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ПРИЛАДНИХ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ	
3.1 Аналіз схемних рішень базових ПСС	
3.2 Математичне моделювання слідкуючих систем	
3.3 Структурний аналіз систем.....	
3.3.1 Режим дистанційної передачі кута повороту ведучого валу.....	
3.3.2 Режим дистанційної передачі швидкості ведучого валу.....	
3.3.3 Особливості синхронно-слідкуючої системи з СКОТ, що працює в трансформаторному режимі.....	
3.4 Аналітичне конструювання слідкуючих систем.....	
4. ПРОГРАМНО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ.....	
4.1 Алгоритм автоматизації проектування.....	
4.2 Розробка програмно-методичного забезпечення аналізу та синтезу ПСС	
4.2.1 Моделювання на основі пакетів прикладних програм.....	
4.2.2 Програмне забезпечення автоматизованого синтезу ПСС.....	
ВИСНОВКИ	
ЛІТЕРАТУРА.....	

ВСТУП

Слідкуючі системи за принципом дії і конструкції є найбільш універсальним типом систем автоматичного керування. Це обумовлено тим, що специфічні робочі режими систем стабілізації і систем програмного керування є окремими випадками можливих режимів слідкування.

Силові слідкуючі системи призначаються для керування об'єктами з великою інерційністю і мають у своєму складі потужні електромашинні і електрогідравлічні виконавчі приводи.

Поряд з силовими слідкуючими системами в автоматичних пристроях широко застосовуються приладові слідкуючі системи. Вони являють собою малогабаритні швидкодіючі системи малої потужності, призначені для дистанційного вимірювання кутових і лінійних переміщень або швидкостей і управління мало інерційними об'єктами .

У роботі викладені питання теорії і практики автоматизації проектування слідкуючих систем авіаційної автоматики.

РОЗДІЛ 1

ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ

1.1 Области застосування та функціональний склад слідкуючих систем

Сучасні системи автоматичного керування знаходять широке застосування у різних галузях. Це пов'язано з необхідністю автоматизації різних систем, комплексів, технологічних процесів і виробничих операцій. З усього різноманіття систем автоматичного керування слід виділити клас слідкуючих систем.

Слідкуюча система - це система автоматичного керування, в якій закон зміни регульованої величини заздалегідь невідомий, і керована величина відтворює керуючий вплив, який змінюється довільно.

Будь-яка слідкуюча система складається з пристрою, що задає вхідний сигнал, порівнюючого пристрою, виконавчого механізму, зворотного зв'язку (рис. 1.1). У деяких системах між виконавчим механізмом і пристроєм, що порівнює застосовують перетворювач сигналу і підсилювач сигналу неузгодження.

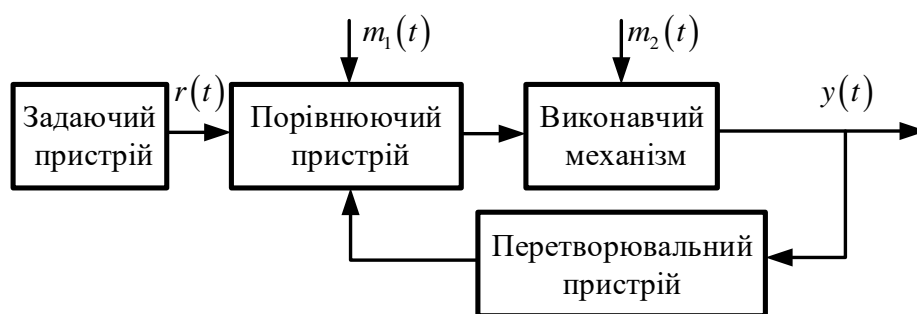


Рис. 1.1 Функціональна схема слідкуючої системи

В слідкуючих системах вхідний вплив і вихідна величина мають однакову фізичну природу, тому коефіцієнт жорсткого зворотного зв'язку буде безрозмірною величиною і зазвичай дорівнює одиниці, тобто вихідна величина в будь-який момент часу із заданою точністю відтворює вхідну величину.

Слідкуючі системи за принципом дії та конструкцією являються найбільш універсальним типом систем автоматичного регулювання. Це зумовлено тим, що специфічні робочі режими систем стабілізації і систем програмного регулювання являється частинними випадку можливих робочих режимів слідкуючих систем.

За конструкцією та електричними схемами сучасні слідкуючі системи доволі різноманітні. Багатовимірну класифікаційну структуру систем наведено на рис.1.2.

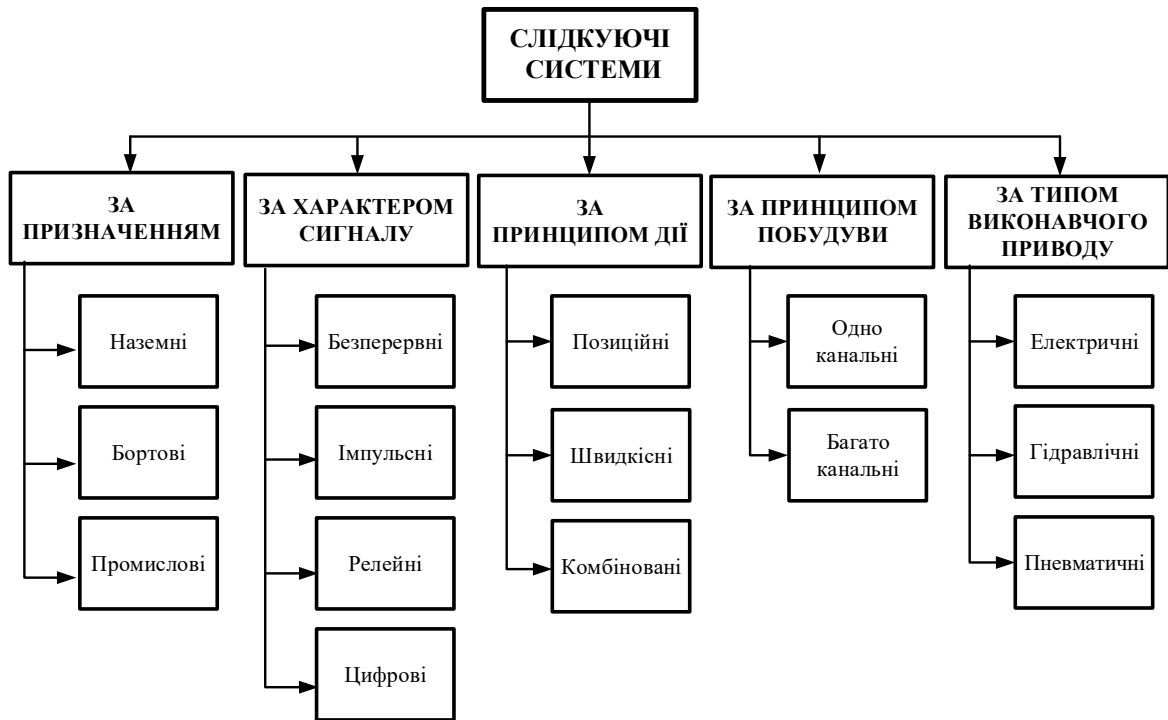


Рис. 1.2 Класифікація слідкуючих систем

При класифікації слід виділити дві основні групи слідкуючих систем: силові та приладні.

Силові слідкуючі системи – це великогабаритні інерційні системи великої та середньої потужності, що працюють у силовому режимі слідкування.

Безпосереднє використання силові слідкуючі системи знаходять у системах керування інерційними динамічними об'єктами. В авіаційної та ракетно-космічної галузі силові слідкуючі системи застосовують в системах керування літальних апаратів (літаків, вертольотів, керованих снарядів тощо), в механізмах повороту крила або двигуна літаках з вертикальним зльотом, в приводах радіолокаційних установок та установок озброєння. Вони незамінні у різного роду наземному устаткуванні.

Конструктивно силові слідкуючі системи мають у своєму складі потужні електромашинні або електрогідравлічні виконавчі приводи. На рис.1.3 – 1.4 надано схеми силових слідкуючих систем електрогідравлічного та електромашинного виконання.

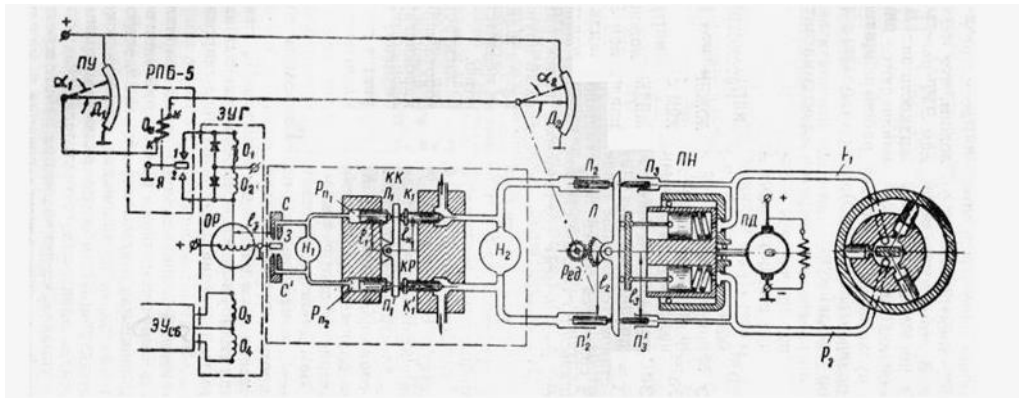


Рис. 1.3 Силова слідкувача електрогідравлічна система

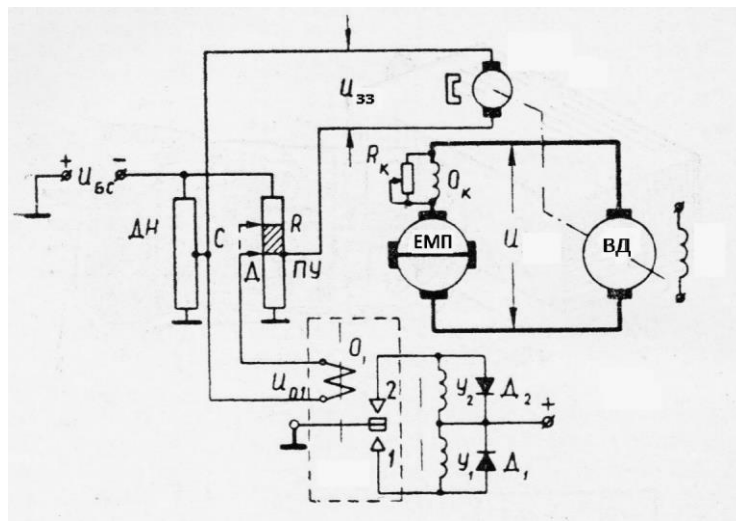


Рис.1.4 Силова слідкувача електромашинна система

Приладні слідкувачі системи (ПСС) представляють собою малогабаритні швидкодіючі слідкувачі системи малої потужності, спеціально призначені для вирішення однієї з задач. Конструктивно їх виконують за електричними та електромеханічними схемами.

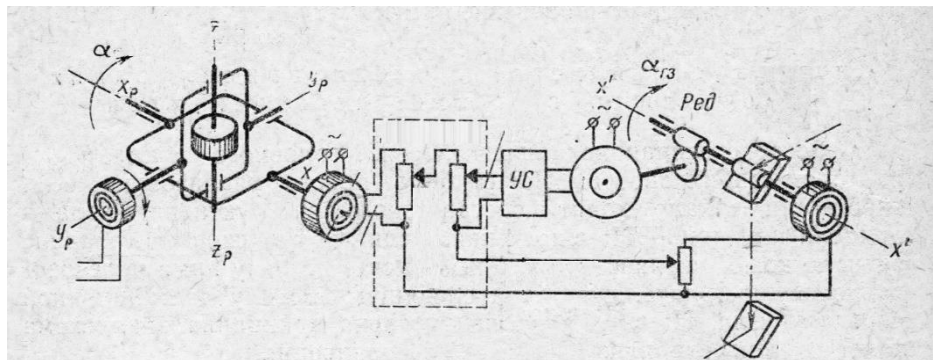


Рис. 1.5 Система стабілізації лінії прицілювання із слідкувачою системою передачі кута

Саме приладні слідкуючі системи використовують для дистанційного вимірювання кутів, лінійних переміщень, кутових та лінійних швидкостей; формування сигналів керування систем автоматичного керування великої потужності, безпосереднього керування мало інерційними об'єктами, а саме стрілками показників, рухомими шкалами та лімбами приладів.

Приладні слідкуючі системи знайшли широке застосування в авіаційній автоматичній. Як приклад на рис. 1.5 наведено систему стабілізації лінії прицілювання приладу спостереження із слідкуючою системою передачі кута. На рис. 1.6 надано слідкуючу систему введення зміни дальності прицільного пристрою.

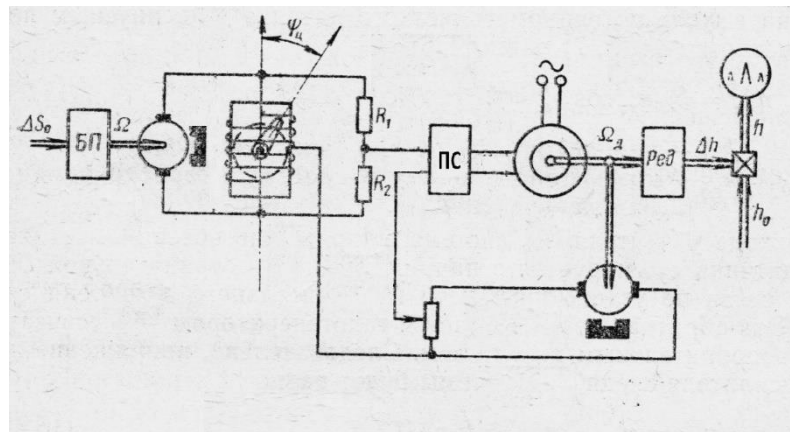


Рис. 1.6 Слідкуюча система введення зміни дальності

До складу ПСС можуть входити сельсини, обертові трансформатори, індукційні та потенціометричні датчики, синусно-косинусні обертові трансформатори й інші датчики керуючих сигналів, напівпровідникові перетворювачі й підсилювачі, мікромодульні й інтегральні схеми, швидкодіючі магнітні й релейні підсилювачі.



Рис. 1.7 Сельсин (а) і обертовий трансформатор (б)

ПСС потенціометричної дистанційної передачі кута на постійному струмі наведено на рис. 1.8. Датчиком кута в цій схемі є кільцевий потенціометр.

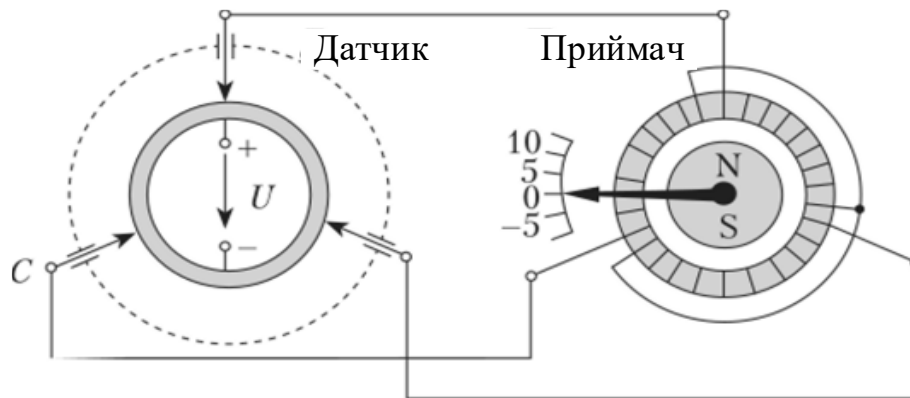


Рис. 1.8 Потенціометрична система дистанційної передачі кута

ПСС сельсинової дистанційної передачі кута по своєму принципу дії певною мірою подібна до потенціометричної системи. У потенціометричній системі використовується перерозподіл різниці потенціалів між трьома щітками датчика, а в сельсиновій системі використовується перерозподіл змінних ЕРС, що індукуються в трьох обмотках сельсина-датчика СД залежно від кута повороту ротора щодо статора (рис. 1.9).

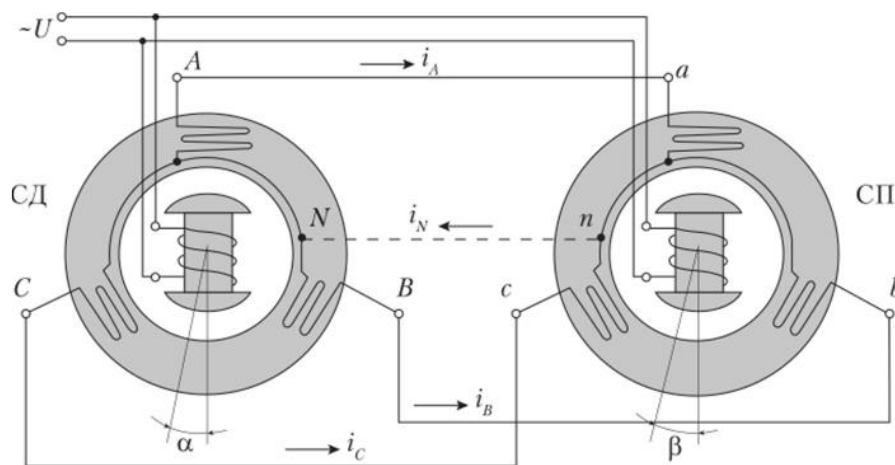


Рис. 1.9 Сельсинова система дистанційної передачі кута

Можливі також інші схемні і конструктивні рішення ПСС: дистанційна передача лінійного переміщення, швидкості переміщення, забезпечення трансформаторного або індикаторного режимів роботи тощо.

Аналіз літературних джерел показав, що на сьогоднішній час найбільш вивчені, описані та дослідженні силові слідкуючі системи, як компоненти систем стабілізації динамічних об'єктів та технологічних процесів. Дослідженням приладні слідкуючих систем було приділена менша увага.

Разом з тим, функціональний склад та області застосування приладних слідкуючих систем досить різноманітні. Якість їх функціонування буде тим краще, чим точніше визначені їх параметри.

У цьому зв'язку, актуальними є напрямки робіт з алгоритмічного і програмного забезпечення автоматизації проектування приладних слідкуючих систем, бо одна з основних цілей автоматизації проектування полягає в оптимізації рішень, тобто в досягненні заданих показників проектного об'єкта при обмежених витратах наявних ресурсів.

Проектування сучасних систем неможливе без застосування цифрової та аналогової техніки. Важливим етапом проектування є синтез структурної схеми системи, що стежить, вибір і узгодження необхідних елементів та їх параметрів, оцінка статичної та динамічної точності системи, визначення необхідності введення корекції, розрахунок коригувальних пристроїв.

1.2 Завдання автоматизованого проектування

Автоматизація проектування, є технологією суть якої полягає у використанні комп'ютерних систем для полегшення створення, змін, аналізу і оптимізації проектів.

Таким чином, будь-яка програма, що працює з комп'ютерною графікою, так само як і будь-який додаток використовуваний в інженерних розрахунках, відноситься до автоматизації проектування.



Рис. 1.10 Технологія автоматизації проектування

Вибір методів і засобів забезпечення автоматизації проектування визначається характером поставленої задачі і характеристиками об'єкта, стосовно якого виконується проектування.

Основною метою автоматизації, як показує багаторічна практика, є підвищення ефективності праці інженерів. Вона включає:

- скорочення трудомісткості проектування і планування;
- скорочення строків проектування;
- скорочення собівартості проектування і виготовлення, зменшення витрат на експлуатацію;
- підвищення якості та техніко-економічного рівня результатів проектування;
- скорочення витрат на натурне моделювання та випробування.

Досягнення цих цілей забезпечується шляхом:

- інформаційної підтримки і автоматизації процесу прийняття рішень;
- автоматизації оформлення документації;
- використання технологій паралельного проектування;
- уніфікації проектних рішень і процесів проектування;
- повторного використання проектних рішень, даних і наробітків;
- стратегічного проектування;
- заміни натурних випробувань і макетування математичним моделюванням;
- підвищення якості управління проектуванням;
- застосування методів варіантного проектування і оптимізації.

Відповідно до сучасних уявлень автоматизація проектування дозволить підвищити якість проектування завдяки:

- розширенню кількості розглянутих проектних рішень;
- більш детальному і всебічному аналізу кожного проектного рішення;
- можливості вирішувати принципово нові проектні задачі з комплексним моделюванням на ЕОМ складних процесів, що супроводжують функціонування проектованого об'єкта;
- використанню нових методів і технічних засобів, що розширюють діапазон операцій у творчому процесі синтезу нової конструкції.

Базові компоненти забезпечення автоматизованого проектування наведені на рис. 1.11.



Рис. 1.11 Базові компоненти забезпечення

Математичне забезпечення - це сукупність математичних моделей, методів і алгоритмів вирішення завдань автоматизованого проектування.

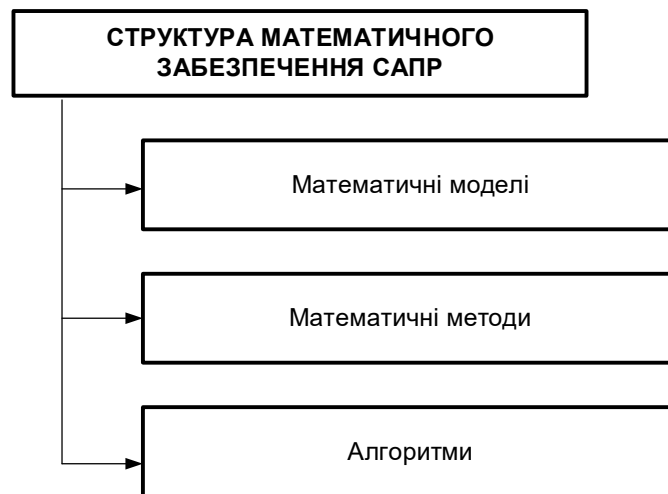


Рис. 1.12 Структура математичного забезпечення

Математична модель - група математичних об'єктів і відносин між ними, що відображає деякі властивості модельованого виробу або процесу.

Дане визначення має на увазі, що математична модель не повинна бути повністю тотожна оригіналу, так як її призначення - зробити можливим дослідження динаміки явища і процесу за допомогою готівкових коштів за рахунок спрощення його уявлення.

Можна стверджувати, що чим вище ступінь тотожності моделі оригіналу, тим складнішою вона буде для складання та дослідження. Тому при проектуванні вдаються, як правило, до математичних моделей, що відображає лише в деякій мірі і лише деякі властивості оригіналу. Проте у міру деталізації та розширення опису оригіналу рівень математичних моделей, що використовуються при його дослідженні, об'єктивно має підвищуватись. Таким чином, в ході проектування процесів і технічних систем можуть використовуватися математичні моделі різних рівнів складності.

Вагомими при математичному моделюванні приймаються як правило такі компоненти:

- рівняння руху, що враховують очікувані умови експлуатації об'єкта;
- умови однозначності, тобто співвідношення, що враховують вплив фізичних констант (наприклад, прискорення вільного падіння, властивості матеріалів), розмірів виробу, початкових і граничних умов;
- рівняння, що описують фізичні процеси взаємодії об'єкта з середовищем;
- рівняння напруженого стану елементів виробу;
- рівняння, що описують зв'язки критерію економічної ефективності з фізичними властивостями.

Чисельним виразом властивостей математичної моделі є її параметри, значення яких не можуть виходити за межі, що встановлюються умовами працездатності.

На математичному забезпеченні як на фундаменті будуються основні компоненти автоматизації проектування – пакети прикладних програм (ППП) (рис.1.13).

Представляючи весь обсяг робіт зі створення ППП у виді піраміди, на нижньому її рівні розміщують математичні моделі, методи. На наступному – алгоритми, далі – обчислювальні алгоритми, на самій останній ступені – програми. Складання програм проявляє собою запис прийнятою мовою програмування обчислювального алгоритму. Досить досвідчений програміст сполучає два верхніх ступені програми, розробляючи зручним для нього методом обчислювальний алгоритм, а потім записуючи його алгоритмічною мовою

програмування. Тому звичайно 70% трудомісткості створення ППП – програмного продукту – займає математичне забезпечення і 30% – складання самих програм.



Рис. 1.13. Структура програмного забезпечення

До складу операційної системи входять, як правило, керуюча програма, програма лінгвістичної обробки і обслуговуюча програма.

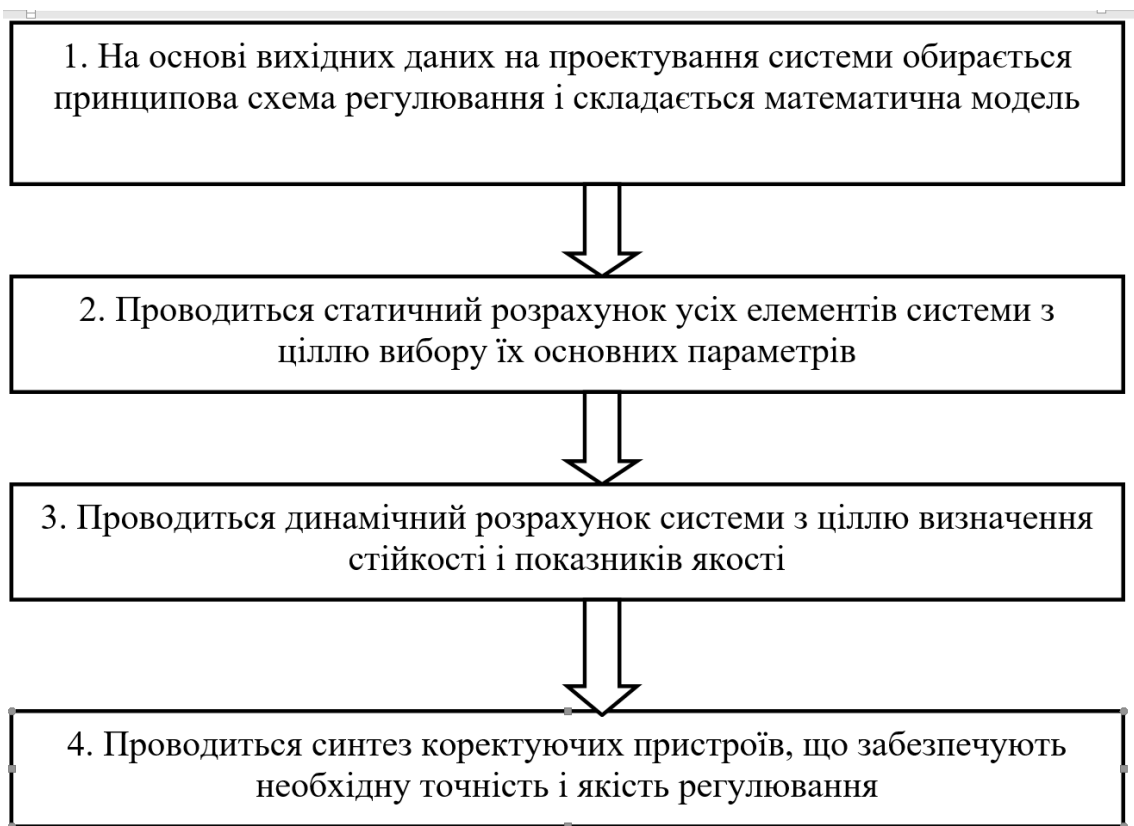
Керуюча - здійснює контроль над усіма обробними програмами. Програма лінгвістичної обробки полегшує введення завдань в ЕОМ за рахунок трансляції вихідної прикладної програми в форму, прийнятну для ЕОМ. Обслуговуюча програма забезпечує стандартні процедури обслуговування, такі, як компіляція системи, сортування, об'єднання елементів набору даних, редагування між програмних зав'язків, операції з файлами.

1.3 Мета та завдання роботи

Задачі розробки та проектування приладних слідкуючих систем тісно пов'язані з задачами синтезу цих систем.

Із усіх існуючих інженерних методів синтезу найбільш ефективними являються методи, що основані на використанні частотних характеристик. Останніми роками інтенсивно розвиваються методи моделювання автоматичних пристроїв за допомогою електронних обчислювальних машин, що дозволяють швидко виконувати як аналіз, так і синтез систем.

Алгоритм синтезу приладних слідкуючих систем може бути представлений технологічним ланцюгом напрямлених досліджень і розрахунків:



Дослідження їх статички і динаміки цілком можуть бути виконані відомими методами моделювання систем на основі базових пакетів прикладних програм, що широко застосовуються в інженерних розрахунках. Для цієї мети може бути рекомендована, наприклад, система моделювання динамічних і подійно-керованих систем Simulink і система інженерних та наукових розрахунків Matlab.

У зв'язку з вищевикладеним метою роботи є

Розробка математичного та програмного забезпечення автоматизованого проектування приладних слідкуючих систем авіаційної автоматики.

При цьому були поставлені завдання:

- визначити області застосування та функціональний склад слідкуючих систем;
- визначити завдання автоматизованого проектування;
- визначити та обґрунтувати критерії оцінки якості слідкуючих систем на стадії проектування;
- розробити математичні моделі слідкуючих систем та виконати структурний аналіз систем;

- провести експериментальну перевірку дієздатності та достовірності запропонованих рішень;
- провести аналітичне конструювання слідкуючих систем підвищеної точності;
- виконати моделювання на основі пакетів прикладних програм;
- запропонувати програмне забезпечення автоматизованого синтезу ПСС.

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПРИЛАДНИХ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ НА СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ

Якість керування - це комплекс вимог, які визначають поведінку системи в сталому і перехідному режимах відпрацювання керуючого або збурюючого впливів. Для аналізу якості управління можуть бути використані прямі та непрямі методи оцінки.

У ході проектування та розрахунках систем якість керування зазвичай оцінюється за їх частотними характеристиками. Підставою для цього є взаємозв'язок між якістю перехідного процесу, викликаного спеціальним впливом, і частотними характеристиками системи.

Перехідна характеристика ПСС може бути обчислена на підставі одного з інтегралів Фур'є

$$H(t) = \frac{A_m(0)}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{A_m(\omega)}{\omega} \sin[\omega t + \varphi(\omega)] d\omega ;$$

$$H(t) = P(0) + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Q(\omega)}{\omega} \cos \omega t d\omega ;$$

$$H(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(\omega)}{\omega} \sin \omega t d\omega ,$$

де $A_m(\omega)$ - амплітудна, $P(\omega)$ - дійсна і $Q(\omega)$ - уявна частотні характеристики замкнутої системи.

На наш погляд, при автоматизації проектування ПСС було б зручніше скористатися критеріями оцінки їхньої якості в різних режимах роботи.

В даний час в теорії автоматичного керування розроблена велика кількість критеріїв оцінки якості систем. Всі вони можуть бути зведені в чотири основні групи:

- критерії точності, які дозволяють оцінити якість САК за величинами помилок керування в різних режимах роботи;
- критерії швидкодії, які характеризують реакцію системи на задаючи і збуджуючі впливи;

- критерії запасу стійкості, які встановлюють, наскільки далеко від межі стійкості знаходиться САК;

- комплексні критерії, які дають оцінку загальних властивостей і враховують одночасно точність, запас стійкості, швидкодію.

Використання того чи іншого критерію визначається об'ємом потрібної інформації по якості приладової слідкуючої системи або системи автоматичного керування, у складі якої працює ПСС.

2.1 Якість ПСС у сталих режимах роботи

Режим стабілізації при постійних вхідних впливах. Рівняння руху системи

$$z(t) = W_x(p)x(t) - W_y(p)y(t)$$

описує як її перехідні процеси, так і усталений рух.

Стале значення регульованої величини $z(t)$ може бути отримано якщо в передаточних функціях $W_x(p)$ і $W_y(p)$ покласти оператор диференціювання $p=0$, що буде відповідати $t \rightarrow \infty$, тобто такому стану системи, коли в ній закінчаться перехідні процеси:

$$z_{ст} = k_x x - k_y y = z_3 - k_y y,$$

де z_3 - задане значення регульованої величини.

Статичні (регульовальна і навантажувальна) характеристики, які відповідають рівнянню статики, представлені на рис. 2.1.

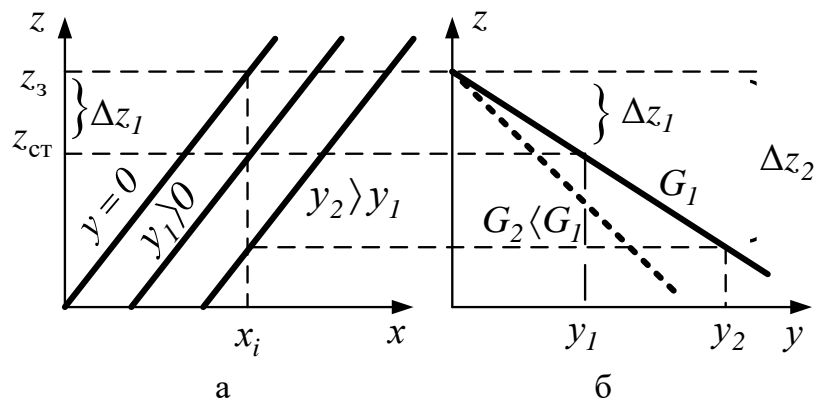


Рис. 2.1 Статичні характеристики:
а – регульовальна; б – навантажувальна

Аналіз отриманих даних показує, якщо система не підпадає під дію зовнішніх збурювань, то сталі значення регульованої величини $z_{ст}$ прямо пропорційне сигналові керування.

$$z_{ст}|_{y=0} = k_x x = z_3.$$

Якщо ж збурювання $y(t)$ відрізняються від нуля, але постійні, то встановлене значення регульованої величини буде відрізнятися від потрібного на величину

$$\Delta z = z_3 - z_{ст} = k_y y.$$

Різниця Δz між заданим і дійсним значеннями регульованої величини називається *абсолютною статичною помилкою* системи.

Наприклад, згідно з вище приведеним рис. 2.1 дійсне значення $z_{ст1}$ регульованої величини відрізняється від заданого z_3 на величину статичної помилки Δz_1 , яка визначається впливом y_1 , що збурює. Із збільшенням збурювання до значення y_2 помилка збільшується до величини Δz_2 .

Таким чином, якість ПСС у сталому режимі стабілізації при постійних вхідних впливах може бути оцінена абсолютною величиною статичної помилки Δz , яка визначається при номінальних значеннях керуючого сигналу і зовнішніх збудженнях.

Інколи може задаватися значення відносної статичної помилки

$$\Delta z\% = \frac{\Delta z}{z_3} \cdot 100\%.$$

Статична помилка ПСС залежить не тільки від зовнішніх збуджуючих впливів, а й від параметрів системи

$$\Delta z = k_y y.$$

Відношення впливу, що обурює, до величини статичної помилки прийнято називати жорсткістю системи:

$$G = \frac{y}{\Delta z} = \frac{1}{k}.$$

Жорсткість характеризує здатність системи протидіяти зовнішнім збурюванням – чим більша жорсткість, тим менша статична помилка ПСС.

Змінюючи в ході експлуатації коефіцієнт регулювання жорсткості, можна знижувати статичну помилку.

Режим стабілізації при випадкових вхідних впливах. Якщо автоматична система працює при випадкових зовнішніх збурюваннях, то для оцінки точності її роботи визначається спектральна щільність помилки

$$S_z(\omega) = |W_y(j\omega)|^2 \cdot S_y(\omega),$$

де $|W_y(j\omega)|^2$ - квадрат модуля частотної передатної функції системи,

а потім обчислюється середнє квадратичне значення помилки

$$\sigma_z = \sqrt{2 \int_0^{\infty} S_z(\omega) d\omega}.$$

Як правило, спектральну щільність помилки знаходять графоаналітичним методом:

- накладають графік $S_y(\omega)$ на графік $|W_y(j\omega)|^2$, як показано на рис. 2.2.

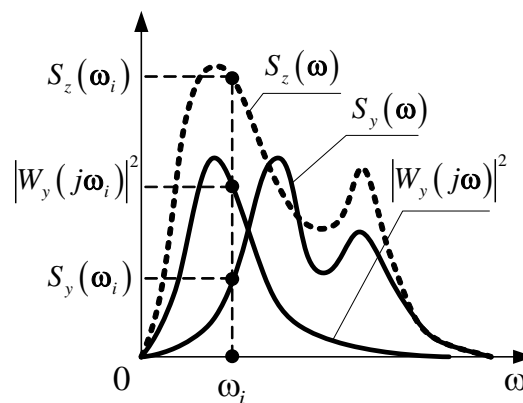


Рис. 2.2 Оцінка точності ПСС

- перемножуючи однойменні ординати $S_y(\omega_i)$ та $|W_y(j\omega)|^2$ на кожній з частот ω_i отримують графік спектральної щільності $S_z(\omega)$ похибки;

- знаходять середнє квадратичне значення похибки $\sigma_z = \sqrt{2 \int_0^{\infty} S_z(\omega) d\omega}$, де

значення $\int_0^{\infty} S_z(\omega) d\omega$ визначається планіметруванням площі, обмеженої кривою спектральної щільності $S_z(\omega)$ та віссю абсцис.

Режим слідування з постійною швидкістю (рис. 2.3). Для оцінки точності систем, що сліdkують, служить стала помилка сліdkування.

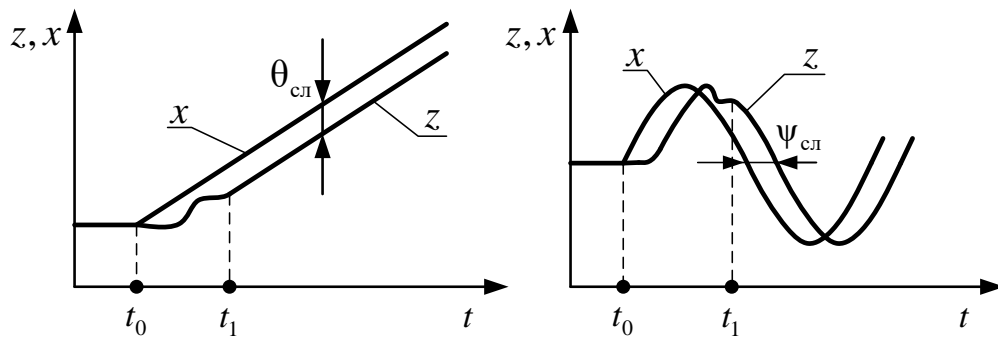


Рис. 2.3 Усталені помилки сліdkуючих систем:
 а – при спостереженні з постійною швидкістю;
 б – при гармонічній зміні сигналу керування

Керуючий сигнал змінюється за законом $k(t)$ - функції, тобто $x = kt$,
 $\frac{dx}{dt} = k = \text{const}$. Зовнішні збудження $y(t)$ постійні і дають сумарну статичну помилку $\Delta z = \text{const}$.

Якщо керуючий сигнал поданий в момент часу $t = 0$, то після деякого перехідного процесу вихідна величина також буде змінюватися за законом $z = kt$ і мати швидкість $\frac{dz}{dt} = k$. При цьому буде мати місце запізнювання вихідної величини відносно вхідної. Це запізнювання і називається помилкою сліdkування $\Theta_{сл}$.

Помилку сліdkування можна визначити, використовуючи загальне рівняння руху системи

$$\begin{aligned} & (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_o) z = \\ & = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_o) x + \\ & + (c_k p^k + c_{k-1} p^{k-1} + \dots + c_1 p + c_o) y \end{aligned}$$

При цьому необхідно врахувати, що для систем, що сліdkують $k_x = \frac{b_o}{a_o} = 1$, тобто $b_o = a_o$. Так як для цього режиму всі похідні, крім перших, будуть рівними нулю, а $pz = px$, отримаємо

$$(a_1 p + a_o) z = (b_1 p + b_o) x + c_o y.$$

Після перетворень знаходимо помилку слідкування

$$\Theta_{ст} = x - z = \frac{a_1 - b_1}{a_0} pz + \frac{c_0}{a_0} y = \Theta_{шв} + \Delta z.$$

Складова помилки слідкування $\Theta_{шв} = \frac{a_1 - b_1}{a_0} pz$ пропорційна швидкості слідкування і називається *швидкісною помилкою* слідуючих систем. Звичайно $\Theta_{шв} \gg \Delta z$.

Помилка слідкування залежить також і від коефіцієнтів $b_0 = a_0$ та b_1, a_1 , які визначаються параметрами системи. Для більшості технічних систем маємо $b_1 = 0$. Очевидно, що для зменшення помилки слідкування доцільно зменшувати коефіцієнт a_1 і збільшувати коефіцієнт a_0 . Однак потрібно мати на увазі те, що при цьому запас стійкості системи буде зменшуватися.

2.2 Якість ПСС в перехідних режимах роботи

Якість перехідних процесів прийнято оцінювати по перехідній (рис.2.4) функції системи, тобто за реакцією системи на одиничний ступінчатий вплив.

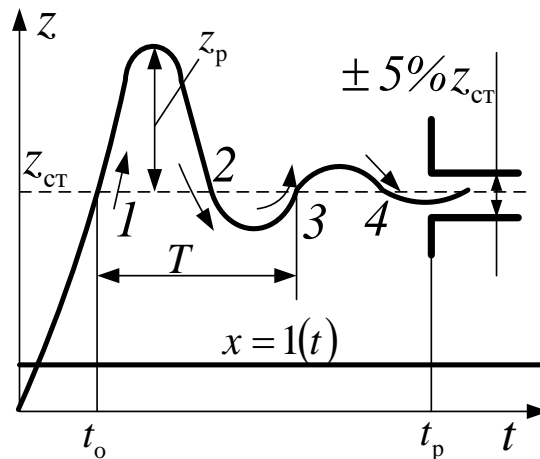


Рис. 2.4 Перехідна характеристика

Звичайно розрізняють такі показники якості перехідного процесу: t_p - час регулювання; z_p - перерегулювання; t_0 - час устанавлення; n - кількість коливань.

Час регулювання t_p характеризує тривалість перехідного процесу. Прийнято вважати перехідний процес таким, що закінчився, якщо відхилення $z(t)$ від встановленого значення $z_{ст}$ не перевищить $\pm 5\%$.

Час устанавлення t_o - це час, за який регульована величина вперше досягає свого усталеного значення $z_{ст}$. Для аперіодичних процесів $t_o = t_p$.

Перерегулювання z_p показує максимальне перевищення регульованою величиною встановленого значення $z_{ст}$. Звичайно перерегулювання визначається в відсотках від встановленого значення, тобто $z_p \% = \frac{z_p}{z_{ст}} 100\%$. Величина перерегулювання характеризує перевантаження системи, які мають місце під час перехідного процесу.

Кількість коливань n визначає коливальність величини, яку регулюють. Перебігом вважається перехід $z(t)$ встановленого значення $z_{ст}$. На рис. 2.4 перебіги показані стрілками і пронумеровані.

2.3 Якість за комплексними критеріями

Для визначення показників якості перехідного процесу необхідно мати графік перехідної функції системи. В реальних системах перехідна функція може бути отримана експериментально. При проектуванні системи перехідну функцію можна отримати за відомими частотними характеристиками або методами моделювання.

За відомими частотними характеристиками системи можна оцінити характер перехідного процесу й не обчислюючи перехідну функцію. Зазвичай для цієї мети використовується АЧХ системи.

На рис. 2.5 показані три характерні АЧХ систем автоматичного керування.

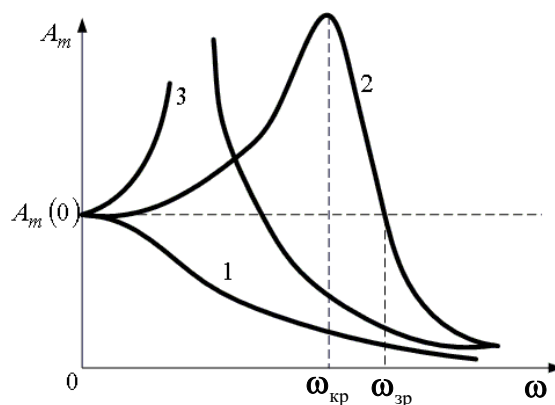


Рис. 2.5 Амплітудно-фазова частотна характеристика

При оцінці якості перехідних процесів потрібно мати на увазі наступне:

- якщо $A_m(\omega)_{\max} = A_m(0)$, що відповідає кривій 1, то перехідний процес протікає без перерегулювання;

- гострі вершини характеристики свідчать про наявність в системі резонансів та про коливальність перехідного процесу (крива 2), а наявність розривів характеристики показує на нестійкість системи (крива 3);

- чим більший показник коливальності $M = \frac{A_m(\omega)_{\max}}{A_m(0)}$, тим більше перерегулювання z_p і час регулювання t_p ;

- чим менша критична частота $\omega_{кр}$, тим більша коливальність перехідного процесу.

- чим вища частота зрізу $\omega_{зр}$, при якій $A_m(\omega) = A_m(0)$, тим швидше затухає перехідний процес, причому $t_o \cong \frac{\pi}{\omega_{зр}}$.

- якщо АЧХ має декілька резонансних максимумів, то найбільший вплив на перехідний процес проявляє низькочастотний резонанс.

В ряді практичних задач для оцінки якості перехідних процесів використовуються логарифмічні частотні характеристики ЛАЧХ і дійсні частотні характеристики ДЧХ $P(\omega)$.

Для практики велике значення мають діаграми якості систем автоматичного керування, що дозволяють всередині області стійкості виділити область бажаних експлуатаційних регулювань, які забезпечують потрібну якість у сталих і перехідних режимах.

При необхідності через показники коливальності можна оцінити й запас стійкості h приладної слідкуючої системи.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

ТА ПРОЕКТУВАННЯ ПРИЛАДНИХ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ

3.1 Аналіз схемних рішень базових ПСС

Приладні слідкуючі системи літальних апаратів представляють собою малогабаритні швидкодіючі слідкуючі системи малої потужності, спеціальна призначені для вирішення однієї з наступних задач:

- дистанційного вимірювання кутів, лінійних переміщень, кутових та лінійних швидкостей;
- вводу кутових та лінійних переміщень і швидкостей в різного роду розрахунково-вирішуючі прилади та обчислювальні механізми;
- формування сигналів керування систем автоматичного керування великої потужності;
- безпосереднього керування малоінерційними об'єктами (стрілками показників, рухомими шкалами та лімбами приладів і т. д.).

За конструкцією та електричними схемами сучасні приладні слідкуючі системи доволі різноманітні. Разом з тим переважна більшість приладних слідкуючих систем авіаційної галузі будується на базі сельсинів або обертових синусно – косинусних трансформаторів. Так в навігаційних системах літальних апаратів та багатьох інших пристроях для вимірювання пройденого шляху та швидкості руху об'єктів часто використовують найпростіші синхронно-слідкуючі системи, виконані на сельсинах, що працюють в індикаторному режимі.

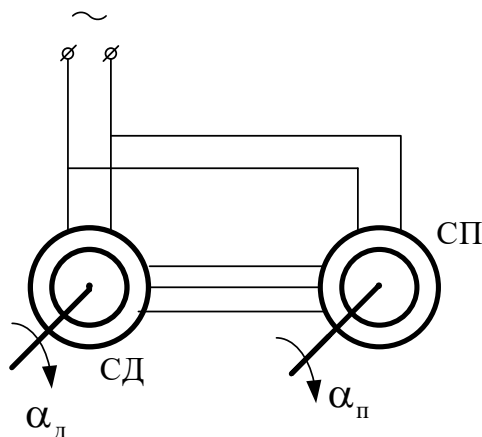


Рис. 3.1 Синхронно-слідкуюча система передачі кута на сельсинах

Електричну схему слідкуючої системи введення кута (кутової швидкості), яка виконана на сельсинах, що працюють в індикаторному режимі, показано на рис. 3.1.

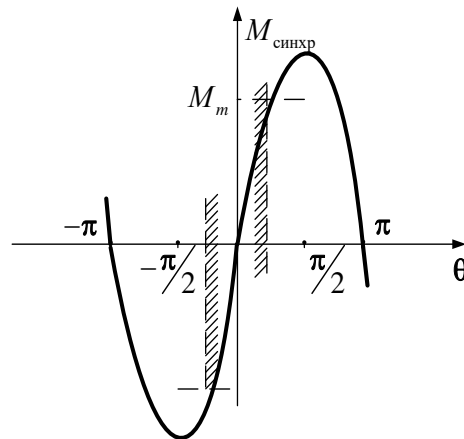


Рис. 3.2 Залежність синхронізуючого моменту від кута θ

При аналізі фізичних процесів, що відбуваються в системі було встановлено, що синхронізуючий момент, що приводить ротори сельсина-датчика (СД) і сельсина-приймача (СП) в узгоджене положення, залежить від кута розузгодження $\theta = \alpha_d - \alpha_n$ між їхніми роторами (рис 3.2) і дорівнює:

$$M_{\text{синхр}} = M_m \sin(\alpha_d - \alpha_n) = M_m \sin \theta, \quad (3.1)$$

де M_m - амплітуда синхронізуючого моменту; α_d - кут повороту ротора сельсина-датчика СД; α_n - кут повороту сельсина-приймача СП.

Поряд з найпростішими слідкуючими системами в сучасних автоматичних пристроях широко використовуються приладні слідкуючі системи з сельсинами або СКОТ, що працюють в трансформаторному режимі (рис. 3.3).

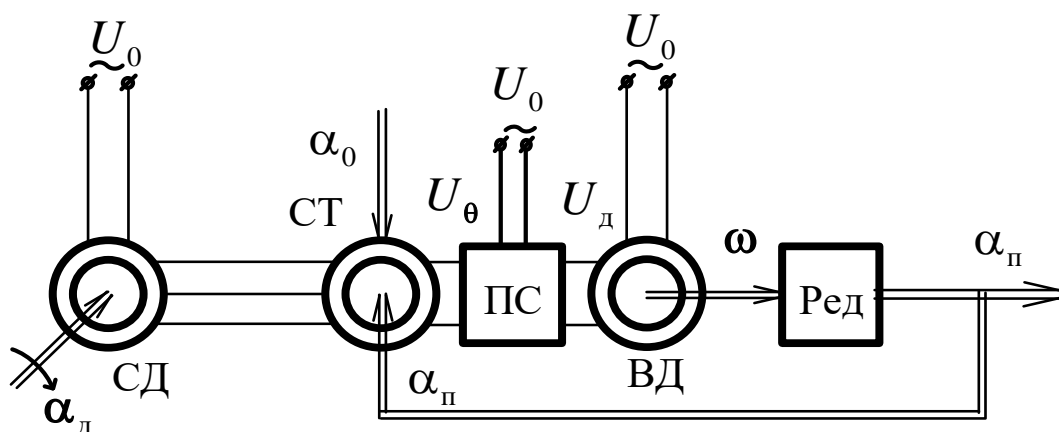


Рис. 3.3 Функціональна схема синхронно-слідкуючої системи на СКОТ

Вони виконують функції тільки датчика розузгодження. Виконавчим органом слідкуючої системи являється спеціальний, як правило, електричний привід.

Із задаючим валом з'єднаний ротор сельсина-датчика СД, що працює спільно з сельсином-трансформатором СТ. Напряга на сигнальній (вихідній) обмотці сельсина-трансформатора пропорційна синусу кута розузгодження

$$u_0 = k_c \sin \theta = k_c \sin(\alpha_d - \alpha_n),$$

де k_c - передатний коефіцієнт сельсинів (крутизна характеристики $u_0 = f(\theta)$), який залежить від конструкції датчиків і величини напруги живлення $\sim U_0$.

При малих кутах розузгодження можна вважати, що $k_c = \text{const}$, $k_c \sin \theta \cong k_c \theta$.

Сигнал U_θ , пропорційний розузгодженню, посилюється за амплітудою і потужністю підсилювачем ПС і подається на обмотку управління виконавчого двигуна ВД, який через редуктор Ред повертає відповідний елемент автоматичного пристрою (тобто „вводить кут”). Одночасно двигун обертає ротор сельсина-трансформатора в сторону зменшення розузгодження, здійснюючи жорсткий від'ємний зворотній зв'язок. Двигун зупиниться, якщо роторі сельсинів будуть зведені в узгоджене положення і кут α_d повороту вихідного валу системи буде дорівнювати куту α_n . Початкове узгодження сельсинів може бути виконане розворотом одного зі статорів (дивись α_0 на рис. 3є3).

Виконавчими електродвигунами таких систем зазвичай являються індукційні електричні двигуни з порожнинним ротором. Не виключено також застосування й малоінерційних електродвигунів постійного струму.

3.2 Математичне моделювання слідкуючих систем

Для малих кутів розузгодження відповідно до рівняння (3.1) маємо $\sin \alpha \cong \alpha$. Тоді рівняння руху ротора сельсина-приймача синхронно-слідкуючої системи (рис.3.1) можна записати у вигляді рівняння моментів

$$M_{jп} + M_{fп} = M_{\text{синхр}} - M_y \cong M_m \theta - M_y,$$

де J_n - зведений момент інерції ротора сельсина-приймача і зв'язаних з ним обертових частин; f_n - зведений момент в'язкого тертя; M_y - момент наван-

таження на валу сельсина-приймача; $M_{jn} = J_{\Pi} \frac{d^2\alpha_{\Pi}}{dt^2}$ - інерційний момент, що діє на валі сельсина приймача; $M_{f\pi} = f_{\Pi} \frac{d\alpha_{\Pi}}{dt}$ - момент в'язкого тертя в опорах сельсина приймача;

Підставляючи у рівняння значення моментів, отримаємо

$$J_{\Pi} \frac{d^2\alpha_{\Pi}}{dt^2} + f_{\Pi} \frac{d\alpha_{\Pi}}{dt} = M_m(\alpha_d - \alpha_{\Pi}) - M_y.$$

Розділивши праву і ліву частини рівняння (4.3) на f_{Π} та переходячи до операторної форми запису, будемо мати:

$$(T_{\Pi}p + 1)p\alpha_{\Pi} = k_{\Pi}[M_m(\alpha_d - \alpha_{\Pi}) - M_y], \quad (3.2)$$

де $T_{\Pi} = \frac{J_{\Pi}}{f_{\Pi}}$ - стала часу ротора сельсин-приймача; $k_{\Pi} = \frac{1}{f_{\Pi}}$ - передатний коефіцієнт.

Рівнянню (3.2) відповідає структурна схема, зображена на рис. 3.4.

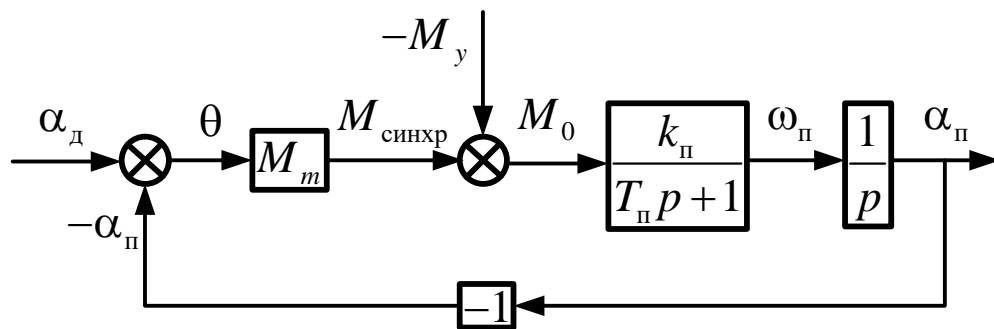


Рис. 3.4. Структурна схема синхронно-слідкуючої системи передачі кута на сельсинах

Структурна схема показує, що синхронно-слідкуюча система на сельсинах являється типовою схемою автоматичного регулювання по відхиленню. Наявність замкнутого контуру регулювання зумовлене внутрішнім від'ємним зворотнім зв'язком, що формує синхронізуючий момент $M_{\text{синхр}}$.

Знайдемо передатні функції системи:

- за керуючим сигналом

$$W_x(p) = \frac{\alpha_{\Pi 0}}{\alpha_d} = \frac{k_{\Pi} M_m}{T_{\Pi} p^2 + p + k_{\Pi} M_m} = \frac{1}{T_{\Pi 2} p^2 + T_{\Pi 1} p + 1},$$

- на зовнішні обурення

$$W_y(p) = \frac{\theta}{M_y} = \frac{k_n}{T_n p^2 + p + k_n M_m} = \frac{1/M_m}{T_{n2}^2 p^2 + T_{n1} p + 1}$$

В отриманих передатних функціях $T_{n2} = \sqrt{\frac{J_n}{M_m}}$ і $T_{n1} = \frac{f_n}{M_m}$ - еквівалентні постійні часу системи. Отже, за своїми статичними і динамічними властивостями аналізована система еквівалентна інерційної динамічної ланці другого порядку.

Рівняння руху системи має вигляд

$$\alpha_n = W_x(p)\alpha_d - W_y(p)M_y = \frac{\alpha_d - \frac{1}{M_m}M_y}{T_{n2}^2 p^2 + T_{n1} p + 1},$$

де знак мінус показує, що дія моменту навантаження зменшує кут повороту ротора сельсина-приймача.

Слідкуюча система на СКОТ, що працює у трансформаторному режимі, (рис.3.3) має у своєму складі підсилювач потужності ПС та виконавчий двигун ВД. Підсилювачі, як правило, є безінерційними динамічними ланками з коефіцієнтом посилення $k_{пс}$.

Робота двигателя постійного тока незалежного возбуждения описывается системой уравнений

$$L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + i_{я} R_{я} = u_{я} - k_{\epsilon} \omega = \Delta u;$$

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = k_M i_{я} - M_y = m_0,$$

де $L_{я}$ - індуктивність якорної обмотки; $R_{я}$ - активний опір обмотки якоря; $k_{\epsilon} \omega = e_{\text{ерс}}$ - проти ЕРС двигуна; J_{Σ} - сумарний момент інерції ротора двигуна; $k_M i_{я} = m_d$ - момент, що розвивається двигуном.

Вважаючи $L_{я} \frac{di_{я}}{dt} \ll i_{я} R_{я}$, знаходимо передатні функції двигуна

$$W_1(p) = \frac{i_{я}}{\Delta u} = \frac{1}{R_{я}}; \quad W_2(p) = \frac{\omega}{\Delta M} = \frac{1}{J_{\Sigma} p}$$

і будуємо його структурну схему

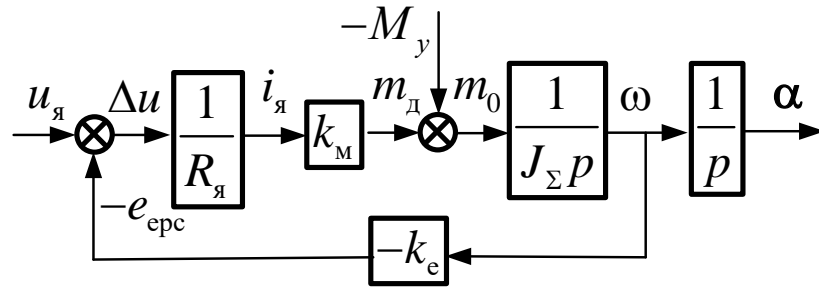


Рис. 3.5 Структурна схема двигуна

Використовуючи узагальнену структурну схему електродвигуна та підсилювача, вважаючи кути розузгодження синхронно-слідкуючої системи на СКОТ малими, отримаємо її структурну схему (рис.3.6).

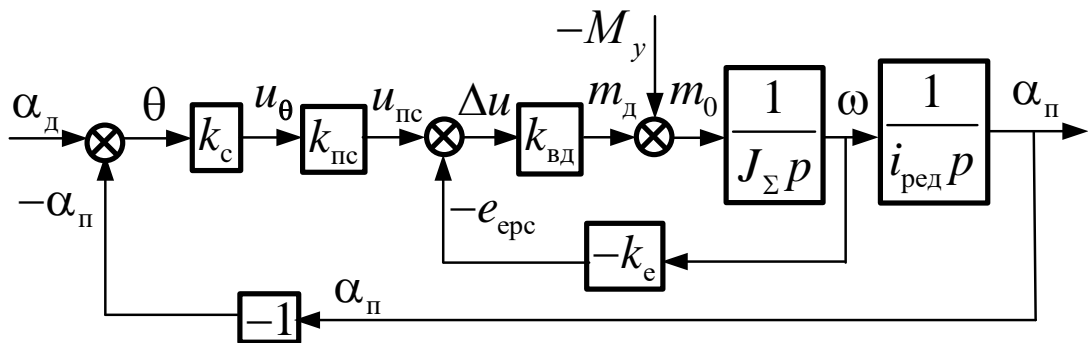


Рис. 3.6 Структурна схема синхронно-слідкуючої системи з СКОТ, що працює в трансформаторному режимі

На схемі передатний коефіцієнт $k_{вд} = \frac{k_M}{R_я}$.

Після згортки контуру внутрішнього зворотного зв'язку початкова структурна схема зводиться до еквівалентної, що зображена на рис. 3.7.

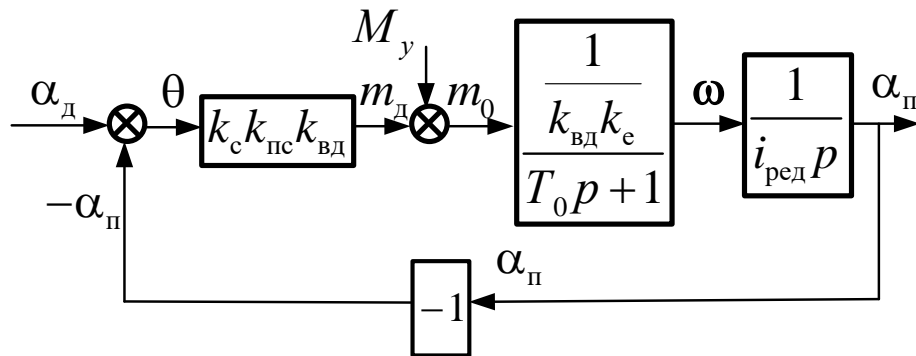


Рис. 3.7 Еквівалентна структурна схема

Електромеханічна стала часу електродвигуна і зв'язаних з його ротором елементів дорівнює $T_0 = \frac{J_\Sigma}{k_e k_{вд}}$.

На основі еквівалентної структури визначаються передатні функції слідкуючої системи:

- за керуючим сигналом α_d

$$W_x(p) = \frac{\alpha_{п0}}{\alpha_d} = \frac{1}{T_0 \frac{k_e}{k_c k_{пс}} i_{ред} p^2 + \frac{k_e}{k_c k_{пс}} i_{ред} p + 1} = \frac{1}{T_{п2}^2 p^2 + T_{п1} p + 1}$$

- за зовнішнім збуренням M_y

$$W_y(p) = \frac{\theta}{M_y} = \frac{\frac{1}{k_c k_{пс} k_{вд}}}{T_0 \frac{k_e}{k_c k_{пс}} i_{ред} p^2 + \frac{k_e}{k_c k_{пс}} i_{ред} p + 1} = \frac{\frac{1}{G}}{T_{п2}^2 p^2 + T_{п1} p + 1},$$

де $G = k_c k_{пс} k_{вд}$ - жорсткість слідкуючої системи;

$$T_{п2} = \sqrt{T_0 \frac{k_e}{k_c k_{пс}} i_{ред}} = \sqrt{\frac{J_\Sigma}{G} i_{ред}} \quad \text{та} \quad T_{п1} = \frac{k_e}{k_c k_{пс}} i_{ред} = \frac{k_e k_{вд}}{G} i_{ред} \quad - \quad \text{сталі часу}$$

слідкуючої системи.

Передатні функції та свідчать, що при зроблених припущеннях слідкуюча система за своїми динамічними властивостями відповідає інерційній ланці другого порядку.

Величина кута α_n визначається загальним рівнянням руху

$$\alpha_n = W_x(p) \alpha_d - W_y(p) M_y = \frac{\alpha_d - \frac{1}{G} M_y}{T_{п2}^2 p^2 + T_{п1} p + 1}.$$

В усталеному режимі роботи:

$$\alpha_n = \alpha_d - \frac{1}{G} M_y = \alpha_{п0} - \theta,$$

де $\theta = \frac{1}{G} M_y$ - статична миттєва помилка системи.

3.3 Структурний аналіз систем

Порівнюючи отримані рівняння руху базових ПСС бачимо їх повну тотожність. У цьому зв'язку розглянемо основні режими роботи ПСС, керуючись моделлю синхронно-слідкуючої системи на сельсинах.

3.3.1 Режим дистанційної передачі кута α_d повороту ведучого валу

Якщо вал, з яким зв'язаний ротор сельсина-датчика, миттєво повернути на кут $\alpha_d = \text{Const}$, то ротор сельсин-приймача почне „відпрацьовувати” цей кут, тобто буде повертатися вслід за ротором сельсина-датчика. Процес відпрацювання заданого кута α_d на рис. 3.8 відповідає інтервалу часу $t_0 - t_1$.

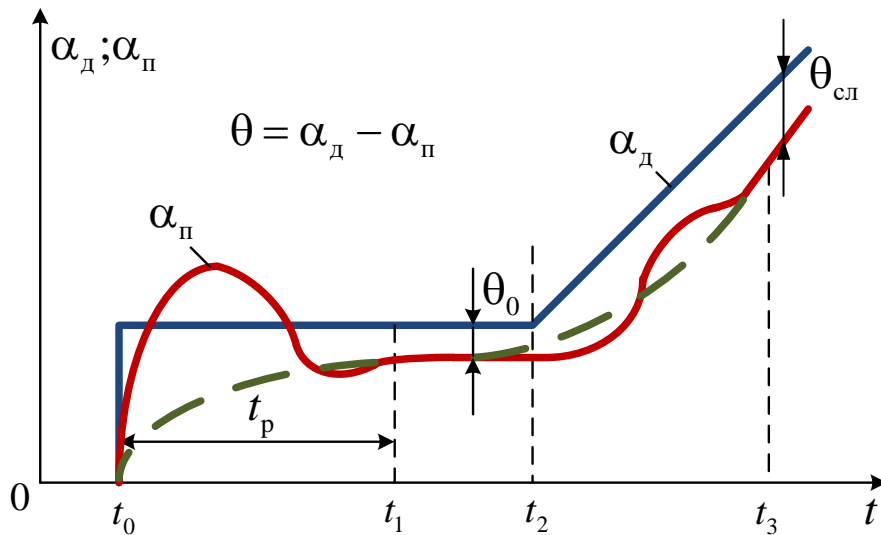


Рис. 3.8 Характеристики перехідних процесів

Характер перехідного процесу буде визначатися коефіцієнтом загасання

$$d_0 = \frac{T_{п1}}{2T_{п2}} = \frac{f_{п}}{2\sqrt{J_{п}M_m}}$$

і буде коливальним (при $d_0 < 1$) або аперіодичним (при $d_0 > 1$).

При сталому моменті навантаження на валу сельсина-приймача усталений кут повороту його ротора знайдемо як

$$\alpha_{п} = W_x(0)\alpha_d + W_y(0)M_y = \alpha_d - \frac{1}{M_m}M_y = \alpha_d - \theta,$$

де $\theta = \frac{1}{M_m}M_y$ - усталена помилка системи.

Статичні характеристики, що відповідають розглянутому режиму, зображені на рис. 3.9.

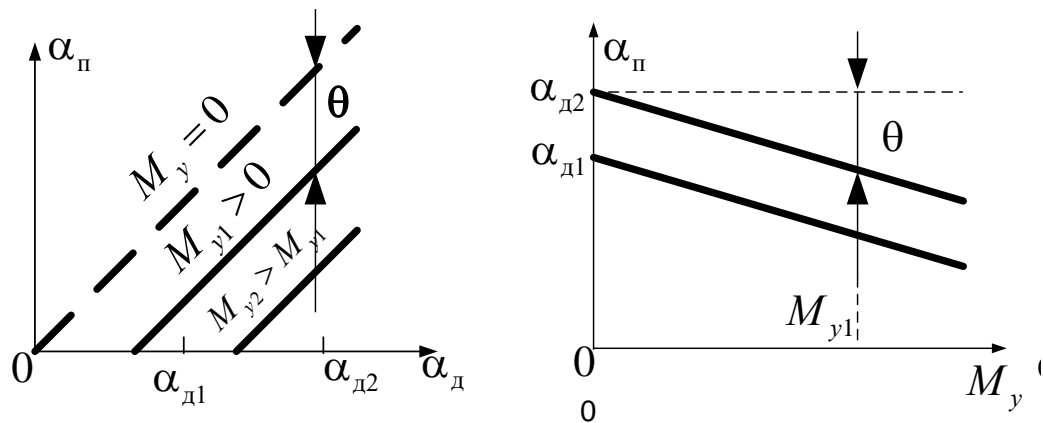


Рис. 3.9 Статичні характеристики

Таким чином, відпрацювання заданого кута $\alpha_d = \text{Const}$ завжди буде відбуватись з деякою статичною помилкою

$$\theta = \alpha_d - \alpha_n = \frac{1}{M_m} M_y,$$

величина якої визначається моментом навантаження і обернено пропорційна амплітуді синхронізуючого моменту.

Для зменшення статичної помилки необхідно вибирати сельсини з достатньо великим синхронізуючим моментом. Але при цьому необхідно враховувати, що при збільшенні амплітуди синхронізуючого моменту коефіцієнт загасання d_0 зменшується і коливальність перехідного процесу зростає. Збільшення приведенного моменту інерції J_n також збільшує коливальність.

В деяких випадках для отримання бажаної якості перехідних процесів при високих значеннях синхронізуючого моменту застосовуються спеціальні демпфери (зазвичай електромагнітні), що прискорюють затухання коливань ротора сельсина-приймача. За наявності демпфера еквівалентна стала часу $T_{п1}$ буде дорівнювати:

$$T_{п1} = \frac{f_n + f_d}{M_m} = \frac{f_\Sigma}{M_m},$$

де $f_\Sigma = f_n + f_d$ - сумарне демпфування; f_d - передатний коефіцієнт демпфера.

3.3.2 Режим дистанційної передачі швидкості ведучого валу (режим слідування)

Якщо, починаючи з деякого моменту часу t_2 (рис.3.8), ротор сельсина-датчика починає рухатись зі сталою кутовою швидкістю $\Omega_d = \frac{d\alpha_d}{dt} = \text{const}$, то після закінчення перехідного процесу з тією самою швидкістю $\Omega_n = \Omega_d$ буде рухатись і ротор сельсина-приймача. Але при рівній усталеній швидкості руху роторів кут повороту ротора сельсина-приймача буде меншим за кут повороту ротора сельсина-датчика (ведучого валу) на величину $\theta_{сл}$, яка називається помилкою слідування. Величина помилки слідування визначається на основі рівняння

$$W_y(p) = \frac{\theta}{M_y} = \frac{1/M_m}{T_{n2}^2 p^2 + T_{n1} p + 1},$$

в якому для даного режиму слід покласти

$$\frac{d\alpha_d}{dt} = \frac{d\alpha_n}{dt} = \Omega = \text{const}.$$

При цій умові отримаємо

$$\theta_{сл} = \frac{1}{M_m} M_y + \frac{f_n}{M_m} \Omega_d = \theta + \theta_{\Omega}.$$

Складова помилки слідування, що пропорційна заданій швидкості ведучого валу, дорівнює

$$\theta_{\Omega} = \frac{f_n}{M_m} \frac{d\alpha_d}{dt} = \frac{f_n}{M_m} \Omega_d$$

і називається швидкісною помилкою слідуючої системи. Зазвичай швидкісна помилка набагато більша за статичну помилку. При великих швидкостях слідування та при великій коливальності перехідних процесів швидкісні помилки можуть призводити до зривів у роботі синхронно-слідуючої системи. Тому параметри системи обираються так, щоб величина $\theta_{сл\max}$ була не більшою за 45° .

3.3.3 Особливості синхронно-слідкуючої системи з СКОТ, що працює в трансформаторному режимі

Незважаючи на тотожність характеристик розглянутих ПСС, синхронно-слідкуюча система з СКОТ, що працює в трансформаторному режимі, має ряд суттєвих переваг перед синхронно-слідкуючою системою передачі кута на сельсинах.

По-перше, при її конструюванні можливо обрати такий виконавчий двигун, при якому забезпечується необхідна потужність на виході. При цьому наявність підсилювача дозволяє розгрузити сельсинну пару СД - СП і тим самим суттєво підвищити точність.

По-друге, жорсткість $G = k_e k_{пс} k_{вд}$, а значить, величину усталених помилок в даній системі можна регулювати зміною передатного коефіцієнта $k_{пс}$ підсилювача. Збільшуючи коефіцієнт $k_{пс}$, можна зменшити статичну помилку

$\theta = \frac{1}{G} M_y$ і помилку слідкування

$$\theta_{сл} = \theta + \theta_{\Omega} = \frac{1}{G} M_y + k_e k_{вд} i_{ред} \frac{1}{G} \Omega_d.$$

Коливальність перехідних процесів визначається співвідношенням параметрів системи і оцінюється величиною коефіцієнта загасання

$$d_0 = \frac{T_{п1}}{2T_{п2}} = 0,5 k_e k_{вд} \sqrt{\frac{i_{ред}}{GJ_{\Sigma}}}.$$

При збільшені жорсткості коефіцієнт затухання зменшується, а коливальність перехідних процесів зростає.

Збільшити загасання при заданій жорсткості можливо, обравши редуктор з великим передатним числом або вводячи жорсткий від'ємний зворотній зв'язок по швидкості (тобто гнучкий від'ємний зв'язок по куту). Проте слід враховувати, що при цьому буде збільшуватися помилка слідкування.

3.4 Аналітичне конструювання слідкуючих систем

При аналізі помилок слідкуючих систем вважалось, що сельсинна пара була ідеальною і не вносила в роботу системи власних помилок. В дійсності навіть сельсини першого класу точності мають власну помилку $\pm 0.25^0$. Наявність зони нечутливості, ексцентриситету та магнітної несиметрії не дозволяє отримати більш високу точність. Якщо у схемі рис. 3.3 замість сельсинів застосовувати СКОТ найвищого (нульового) класу точності, то власну помилку можна зменшити у 2-3 рази до 5-7 кутових хвилин. Проте для сучасних автоматичних приладів авіаційної техніки, наприклад для навігаційних комплексів, автопілотів тощо необхідні слідкуючі системи більшої точності.

Автором запропоновано підвищення точності ПСС застосуванням двоканальних схем вимірювання кутових розузгоджень. Двоканальні слідкуючі системи можуть бути виконані з механічною або електричною редукцією.

Принцип побудови двоканальної слідкуючої системи з механічною редукцією зображений на рис. 3.10.

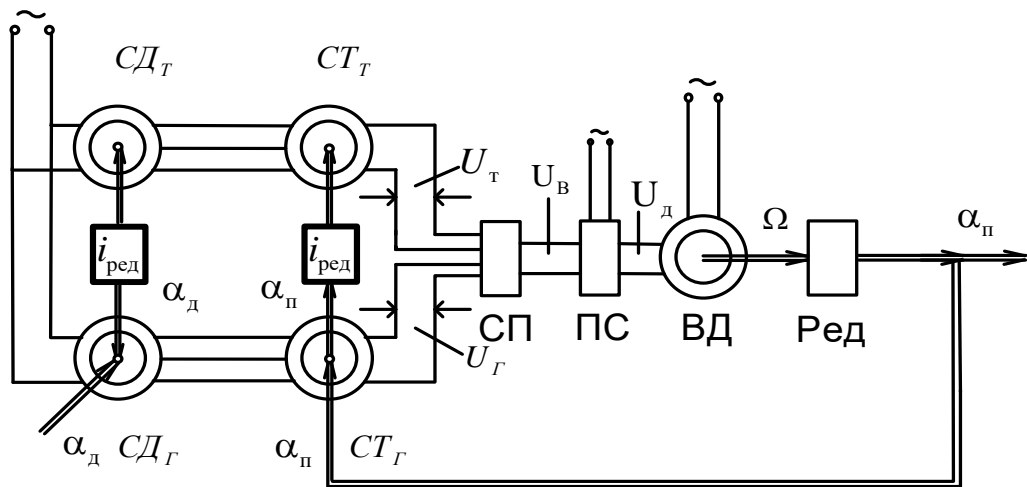


Рис. 3.10 Схема двоканальної слідкуючої системи

З ротором сельсина-датчика $СД_Г$ каналу грубого відліку через редуктор, що підвищує, з передаточним числом $i_{ред}$ з'єднаний ротор сельсин-датчика $СД_Т$ точного відліку. Аналогічно з'єднані між собою й сельсин-трансформатори $СТ_Г$ і $СТ_Т$.

При малих кутах $\alpha_д$ напруга u_T на виході каналу грубого відліку може виявитися недостатньою для керування системою. Система в цьому випадку

управляється напругою u_T сельсина-трансформатора точного відліку. Чутливість цього сельсина по відношенню до вхідного сигналу α_d в $i_{ред}$ разів вище, так як кут повороту ротора сельсина - датчика точного відліку буде в $i_{ред}$ разів вище кута повороту сельсин-датчика грубого відліку.

Перехід від управління по каналу грубого відліку до управління по каналу точного відліку (і навпаки) здійснюється автоматично за допомогою спеціальних пристроїв (СП) – селекторів.

Селектори можуть бути виконані з використанням електромагнітних реле, спеціальних напівпровідникових електронно-лампових схем, неонових ламп та тиратронів і т.д. Найбільше практичне використання отримали селектори з нелінійними діодними обмежувачами. Схему селектора на діодних обмежувачах наведено на рис. 3.11.

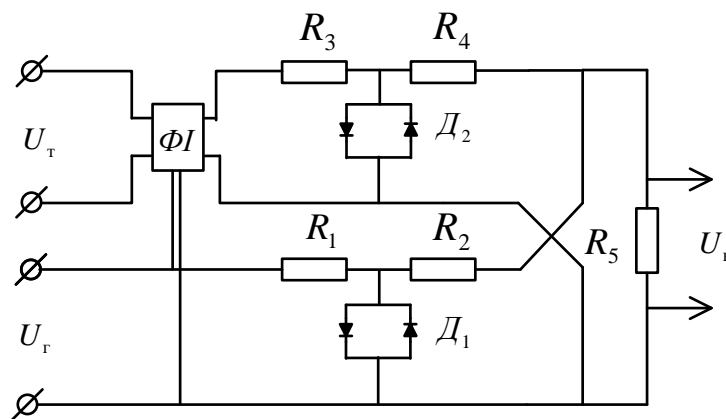


Рис. 3.11 Схема селектора на діодних обмежувачах

Хвильову діаграму огинаючих модульованих напруг несучої частоти для паралельної селекції сигналів грубого та точного відліків подано на рис. 3.12.

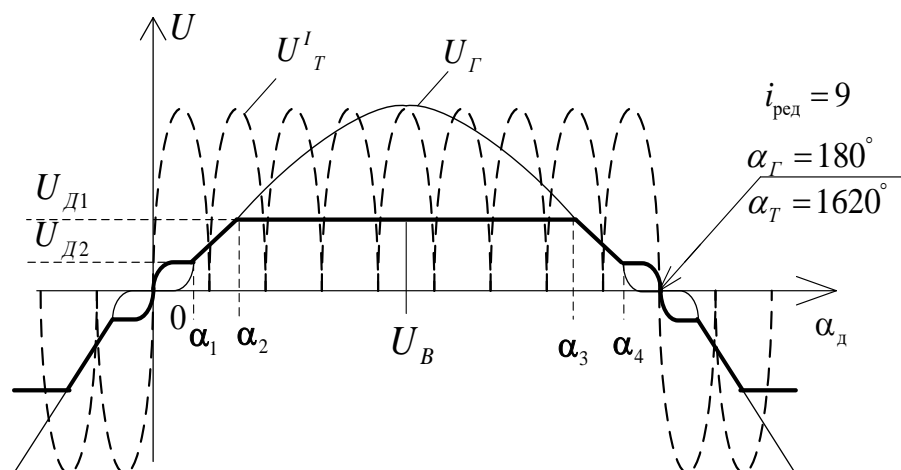


Рис. 3.12 Хвильова діаграма

В каналах грубого і точного відліків ввімкнені діодні Т-подібні обмежувачі $R_1 - R_2 - Д1$ і $R_3 - R_4 - Д2$. Діодні ячейки обмежувачів налаштовані так, що $u_{д1} > u_{д2}$.

При малих кутах $\alpha_d < \alpha_1$ (рис. 3.12) працює канал точного відліку. Крутизна характеристики $u_0 = F(\alpha_d)$ визначається крутизною сигналу точного відліку і зона нечутливості практично відсутня.

На інтервалі кутів $\alpha_1 < \alpha_d < \alpha_2$ на виході буде діяти напруга u_r грубого каналу, величина якого при $\alpha_d > \alpha_2$ обмежується двоїною ячейкою Д1 і дорівнює $u_{д1}$. (Це обмеження необхідне для підсилювачів, виконаних на транзисторах).

При $\alpha_d > \alpha_n$ знову починає переважати напруга каналу точного відліку і т.д.

Фазовий інвертор ФІ забезпечує збіг за фазою напруг несучої частоти сигналів грубого і точного відліків. Фазоінвертор вмикається в канал точного відліку, а управляється напругою u_r каналу грубого відліку. Напруга на виході фазоінвертора завжди співпадає по фазі з напругою каналу грубого відліку. Для цього через кожні 180° кута повороту ротора сельсина-трансформатора точного відліку CT_T фаза його вихідної напруги змінюється на 180° .

Слідкуючи системи з двома каналами вимірювання кута розузгодження мають змінну жорсткість. При малих кутах розузгодження жорсткість системи визначається передатним коефіцієнтом $k_{ст}$ сельсинів точного каналу $G_T = k_{ст} k_{пс} k_{вд} i_{ред}$, а при великих кутах розузгодження – коефіцієнтом $k_{ст}$ сельсинів грубого каналу $G_T = k_{ст} k_{пс} k_{вд}$. Якщо в грубому і точному каналах застосовуються однакові сельсини, то $G_T = i_{ред} G_T$. Тобто, при малих кутах розузгодження помилки слідкуючої системи (статична помилка θ і помилка слідкування $\theta_{сл}$) зменшується в $i_{ред}$ раз.

Необхідно відмітити, що збільшення жорсткості в цих системах призводить до відповідного підвищення коливальності системи і в багатьох випадках необхідно застосовувати демпфіруючі пристрої.

Проте збільшення передаточного числа $i_{ред}$ редуктора обмежене не тільки умовами стійкості. При збільшенні передаточного числа збільшуються власні помилки редуктора: помилка Δ_3 , зумовлена неточністю зачеплення, і помилка $\Delta_л$, зумовлена наявністю люфту. Сумарна статична помилка слідкуючої системи буде при цьому рівна:

$$\theta_{\Sigma} = \frac{\theta_r}{i_{ред}} + \Delta_3 + \Delta_л = \frac{1}{Gi_{ред}} M_y + \Delta_3 + \Delta_л.$$

При деякому значенні передаточного числа редуктора сумарна помилка слідкуючої системи знову почне збільшуватися. Враховуючи цю обставину, передаточне число редуктора зазвичай вибирають з умови $i_{ред} \leq 30$.

Передаточне число доцільно брати непарним, щоб грубий і точний канали не мали спільних нестійких і помилкових нулів. При парному передаточному числі нестійкі та помилкові нулі мають виключатися за допомогою спеціальних пристроїв, що забезпечують невеликий фазовий зсув напруги грубого каналу.

Помилки, зумовлені наявністю механічного редуктора, можна виключити, якщо використати електричну редукцію каналів грубого і точного відліків. При електричній редукції ротори датчиків точного і грубого відліків встановлюються на одному валі, причому число полюсів датчика, що працює в точному каналі обирається в $i_{ред}$ разів більше числа полюсів датчика грубого каналу. В грубом каналі зазвичай застосовуються двополюсні сельсини або СКОТ, а в точному – багатопольосні обертові трансформатори.

РОЗДІЛ 4

ПРОГРАМНО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ

4.1 Алгоритм автоматизації проектування

З метою організації та проведення проектування на єдиній методологічній основі слідкуючих систем авіаційної автоматики, підвищення достовірності отриманих результатів та зменшення часових та фінансових витрат на виконання робіт був запропонований алгоритм проектування. Алгоритм наведений на рис. 4.1.

Представлена методика дозволяє розбити процедуру проектування на відповідні етапи, кожен з яких вирішує самостійну підзадачу. Це дає можливість зосередити зусилля на вирішенні підзадачі, реалізованої у вигляді окремої процедури або функції. Зв'язки скерування між етапами здійснюються за допомогою відповідних звернень до них (умов), потім відбувається передача інформації від одного етапу до іншого.

Алгоритм може бути реалізований на комп'ютерно-інтегрованом комплексі проектування слідкуючих систем авіаційної автоматики.

Оснoву комплексу складатиме ЕОМ з базою даних за вихідними параметрами $\Delta z, \sigma_z, \Theta_{\text{сл}}, z_1, n, t_o, t_p, h, \gamma, \Omega_z, \dots$ ПСС ЛА, що визначаються нормативно-технічною документацією.

Вхідними параметрами алгоритму є параметри вузлів та блоків конкретної системи: k_i – статичні передатні коефіцієнти (коефіцієнти підсилення), T_i – постійні часу. Ці параметри можуть бути визначені відомими методами. На виході алгоритму отримуємо рекомендації щодо оптимальних значень слідкуючих систем.

Початковим етапом проектування є побудова моделі, що найкращим чином відображає властивості реального об'єкту. Створюючи математичну модель, ми прагнемо залишати для розгляду лише найбільш істотні параметри, робити математичний опис процесу якомога простішим.

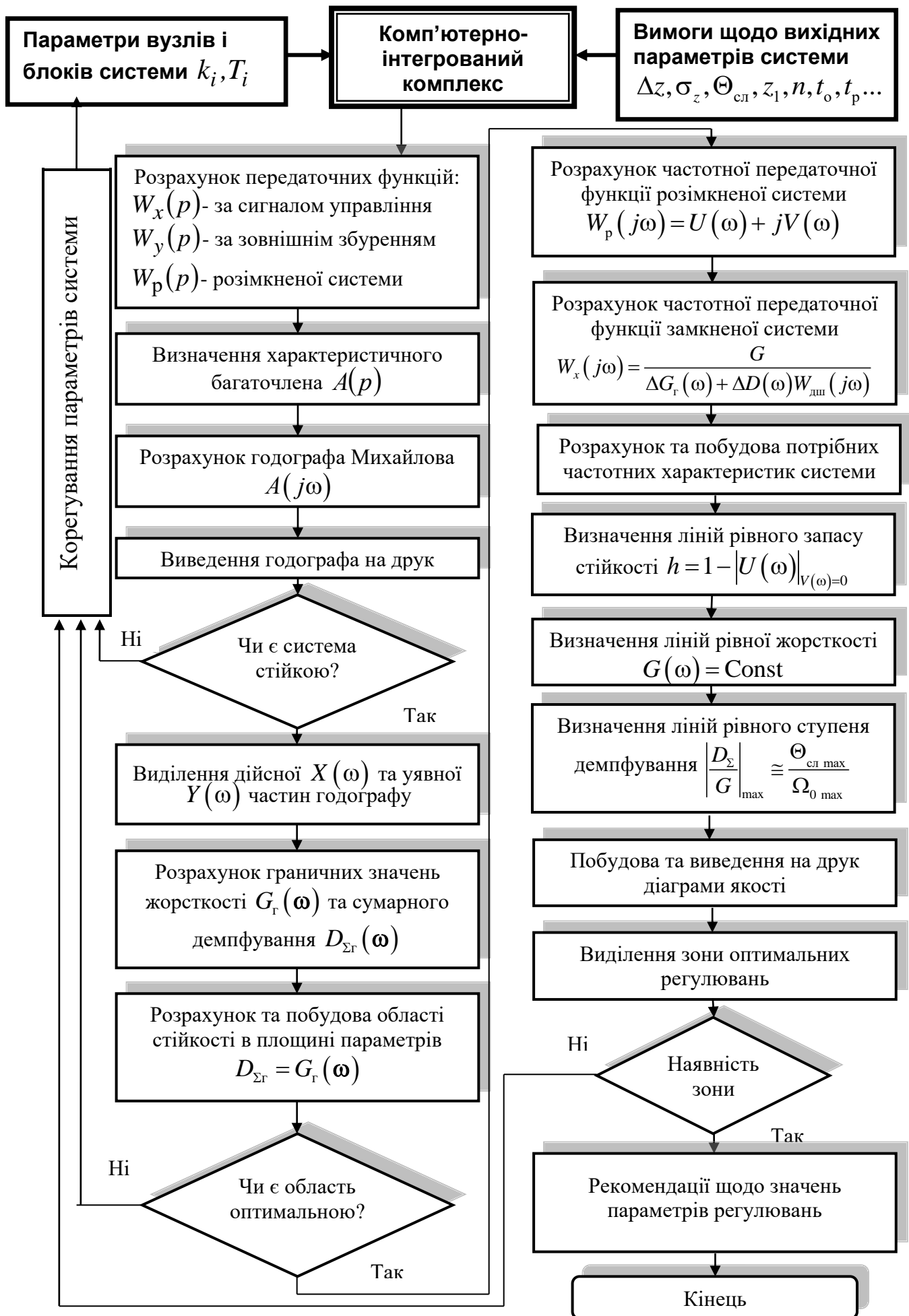


Рис. 4.1 Автоматизація проектування ПСС

Створення моделі здійснюється зіставленням теорії та експерименту. Дане зіставлення носить, як правило, ітераційний характер, що і можливо відобразити у вигляді алгоритму. На кожному кроці ітерації відбувається уточнення відповідної моделі, відповідного процесу.

Кінцевим етапом проектування є, безпосередньо, проектування оптимальної ПСС.

Таким чином, розроблена та впроваджена автоматизації проектування:

- ✓ скорочує час проектування об'єкта;
- ✓ створює реальний нелінійний об'єкт у віртуальному просторі ПК;
- ✓ підвищує якість і точність його функціонування;
- ✓ зменшує витрати на виробництво, зокрема на його стендові та натурні випробування.

Обов'язковою складовою ефективною автоматизації є поєднання програмно-методичного забезпечення проектування ПСС з її реалізацією на ЕОМ.

4.2 Розробка програмно-методичного забезпечення аналізу та синтезу ПСС

В інженерній практиці, особливо при автоматизованому виборі кращих проектних рішень, усе ширше застосовуються математичні методи аналізу й синтезу складних технічних систем. Це стало можливим завдяки появі швидкодіючих ЕОМ. Однак широкі можливості комп'ютерної техніки реалізуються лише при відповідному методичному забезпеченні, тому що застосування методів моделювання й оптимізації складних технічних систем пов'язане із труднощами реалізації математичних методів на практиці, і насамперед, із труднощами розробки й впровадження алгоритмів і програм для ЕОМ.

У цьому зв'язку автором кваліфікаційної роботи запропоновано рішення завдання програмно-методичного забезпечення проектування ПСС :

- моделюванням на основі базових пакетів прикладних програм;
- розробкою програм автоматизації аналізу й синтезу систем.

4.2.1 Моделювання на основі пакетів прикладних програм

Математична модель ПСС із достатньою для інженерних розрахунків точністю описує роботу системи і дозволяє проводити її дослідження.

В реальних умовах роботи, керуючі і збурюючі сигнали діють одночасно. Тобто, закон реагування на них системи визначимо на основі методу суперпозиції:

$$\Omega(t) = \sum_{i=1}^N W_i(p) \cdot Y_i(t) \quad ,$$

де $W_i(p)$ - передатна функція системи по каналу i -го вхідного впливу на нього; $Y_i(t)$ - i -е керуючий або збурюючий вплив.

До складу ПСС можуть входити різноманітні за фізичною природою та конструкцією елементи. Проте, однотипність структурних схем складових вузлів, блоків і підсистем дозволяють говорити про деяку типову ПСС і побудувати її структурне зображення:

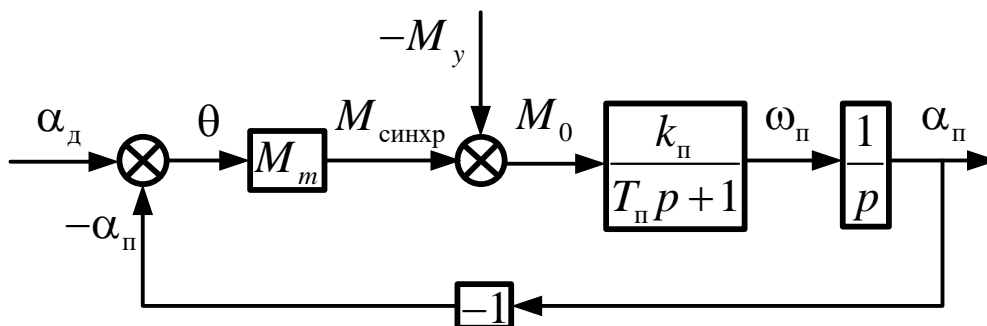


Рис. 4.2 Структурна схема синхронно-слідуючої системи

$$T_{\pi} = J_{\pi} / f_{\pi} - \text{стала часу ротора сельсин-приймача};$$

$$k_{\pi} = 1 / f_{\pi} - \text{передатний коефіцієнт};$$

$$M_m - \text{амплітуда синхронізуючого моменту};$$

$$k_{\pi} / (T_{\pi} p + 1) - \text{передатна функція сельсину-приймача}.$$

Вивчення і узагальнення літературних джерел дозволили прийняти наступні значення коефіцієнтів моделі системи: $k_{\pi} = 0,2$, $T_{\pi} = 0,05$, $M_m = 200$.

Наявність структурної схеми ПСС і параметрів, що входять до її складу, дозволяє здійснити розробку нових й модернізацію існуючих систем, проводити

їх всебічні експериментальні дослідження методами, як машинного моделювання, так математичного програмування.

Відповідно отриманій структурній схемі, в середовищі MatLab на основі пакету прикладних програм Simulink була побудована розрахункова модель ПСС.

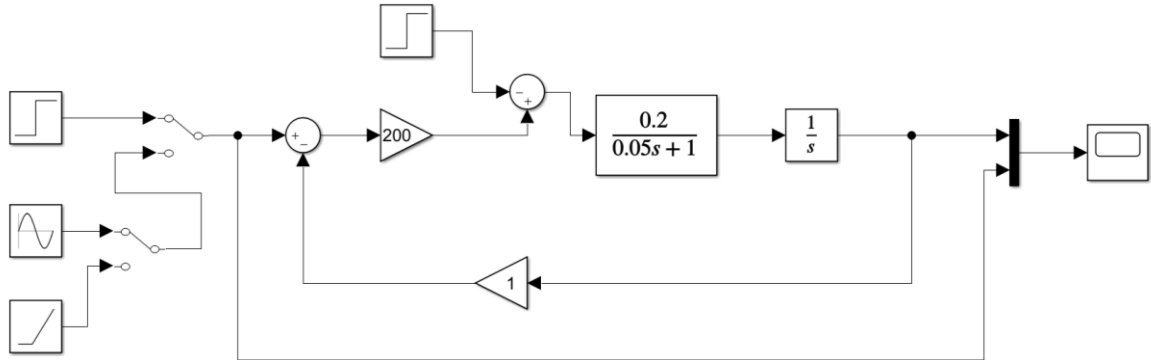


Рис. 4.3 Модель ПСС

В процесі синтезу системи в модель вводили коректуючі контури й додаткові елементи, що забезпечують оптимізацію процесів керування.

Дослідження проводились при типових (стандартних) сигналах, які відповідають режиму дистанційної передачі кута та режиму дистанційної передачі швидкості.

Були визначені перехідні характеристики системи за сигналом керування і зовнішнього збурення, які відповідають режиму дистанційної передачі кута. Характеристики подано на рис. 4.4.

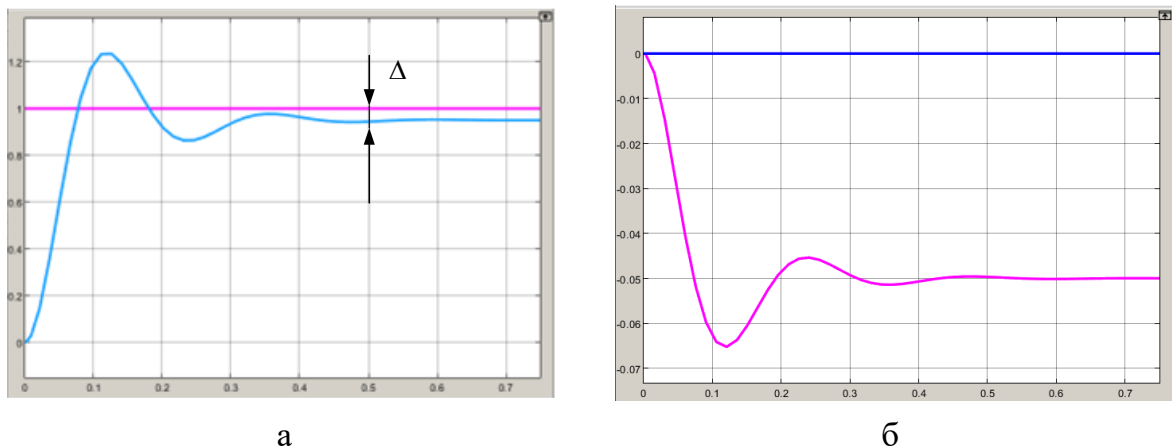


Рис. 4.4 Перехідні характеристики ПСС:

а – за сигналом керування; б – на зовнішні обурення

Аналіз характеристик показує, що вибрані параметри ПСС задовольняють вимогам технічних умов за показниками якості в динамічному режимі передачі кута: $t_p = 0,4$ с ; $t_o = 0,08$ с ; $z_p = 22\%$; $n = 3$.

Водночас система ПСС має досить велику абсолютну помилку $\Delta = 0,06$. Зі збільшенням впливу, що обурює, абсолютна помилка зростає.

Як показали дослідження, абсолютна помилка слідкуючої системи знижується при збільшенні жорсткості системи (рис. 4.5). Однак при цьому збільшується коливність ПСС.

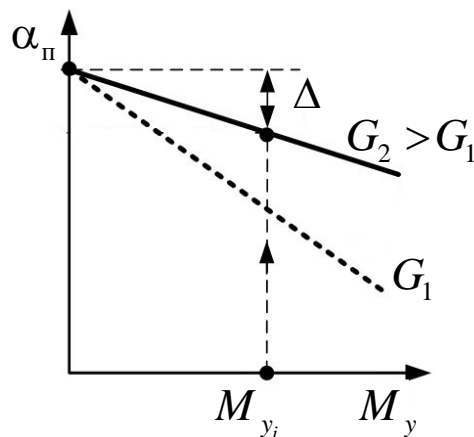


Рис. 4.5 Вплив жорсткості ПСС на абсолютну помилку системи

Характеристики ПСС за сигналом керування, які відповідають режиму дистанційної передачі швидкості, надано на рис. 4.6.

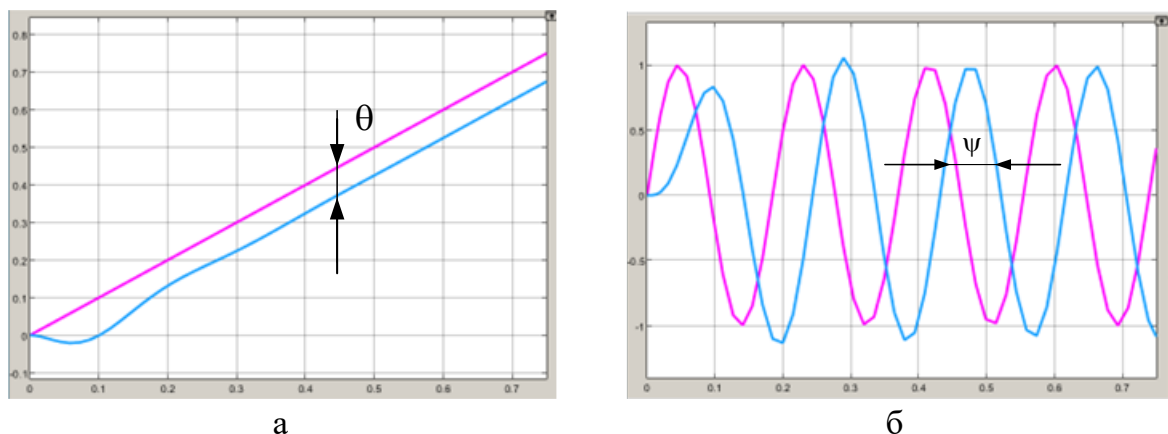


Рис. 4.6 Характеристики ПСС в режимі передачі швидкості:

а – при зміні сигналу керування за законом $x = kt$;

б – при гармонічній зміні сигналу керування

Аналіз характеристик показує, що у динамічному режимі передачі швидкості є досить висока помилка стеження $\theta = 0,08$; $\psi = 0,08$. Зі зростанням швидкості передачі помилка стеження $\theta_2 > \theta_1$ зростає (рис. 4.7).

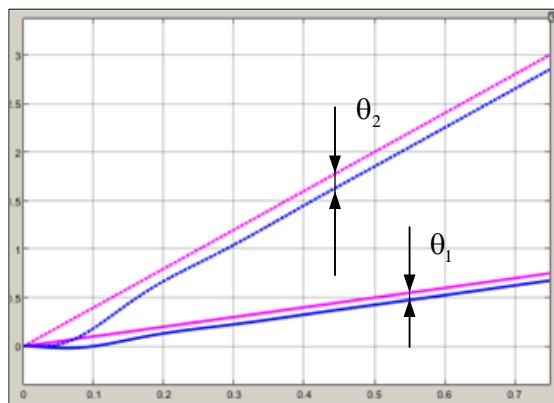


Рис. 4.7 Вплив швидкості передачі на помилку слідкування

Для того щоб досягти бажаних показників якості процесів керування в ПСС, тобто необхідної точності та якості перехідних процесів, є два шляхи.

- ✓ перший полягає у зміні конструктивного рішення, тобто переходу до двоканальної слідкуючої системи;
- ✓ другий полягає в тому, що до складу ПСС може бути введені додаткові ланки, які називають коригуючими пристроями.

Послідовний коригуючий пристрій включається безпосередньо в прямий ланцюжок елементів системи. Воно забезпечує додаткове перетворення керуючого сигналу, не змінюючи динамічних властивостей ланок.

Послідовні коригувальні пристрої щодо технічної реалізації мають деяку перевагу в порівнянні з паралельними.

При введенні в прямий ланцюжок ПСС (рис. 4.8) коригувального пристрою, сигнал на виході якого містить, крім складової, пропорційної розузгодженню також складову, пропорційну інтегралу від розузгодження, тобто

$$\theta_k(t) = k \left[\theta(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \theta(t) dt \right] = 6 \left(1 + \frac{1}{p} \right) \theta(t),$$

представляється можливим зменшити помилку регулювання теоретично до нуля.

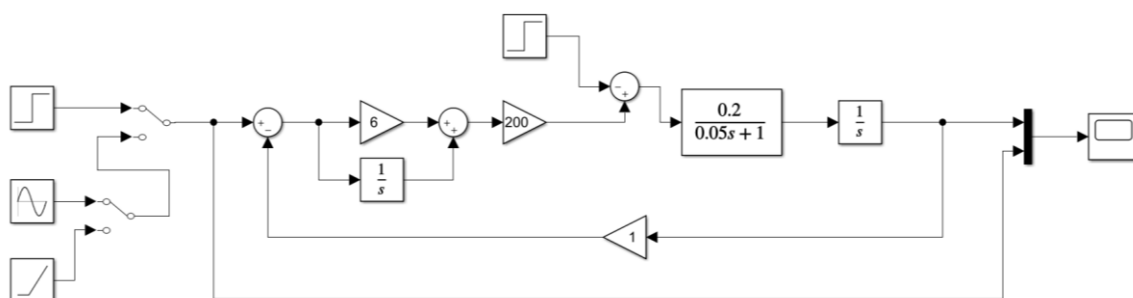


Рис. 4.8 Модель ПСС з корегуючим контуром

Рис. 4.9 ілюструє отримані результати. На ньому представлені осцилограми сигналів керування - червоний колір, і вихідного сигналу - синій колір, для ПСС з коригуючим пристроєм як для режиму дистанційної передачі кута, так і для режиму дистанційної передачі швидкості. Похибки $\Delta = 0$, $\theta = 0$, $\psi = 0$ практично відсутні.

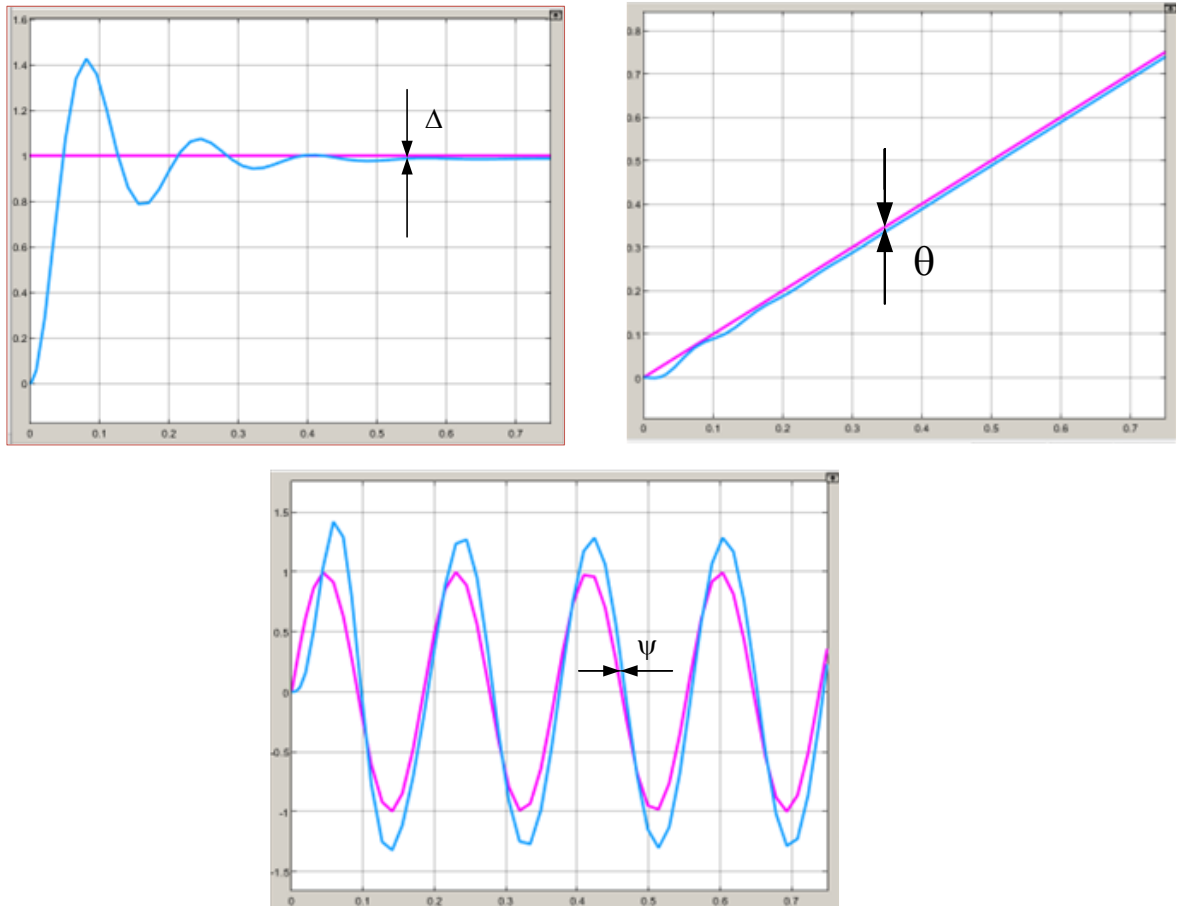


Рис. 4.9 Характеристики ПСС при наявності коригуючого пристрою

Виходячи з вищевикладеного, приходимо до висновку про необхідність включення до складу ПСС інтегруючого контуру корекції.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що отримані характеристики ПСС відповідають вимогам технічних умов.

4.2.2 Програмне забезпечення автоматизованого синтезу ПСС

Корегувальні пристрої широко використовуються у різних системах автоматичного керування. В даний час на світовому ринку пропонуються універсальні мікропроцесорні пристрої, які потребують спеціального налаштування в складі систем керування.

Повноцінне використання переваг корегувальних пристроїв забезпечується тільки при правильному розрахунку їх параметрів з урахуванням особливостей характеристик керованих об'єктів.

Отже, використання графічного інтерфейсу MATLAB дозволяє розробити універсальний додаток для дослідження ПСС, що забезпечить швидкий та зручний вибір необхідних коефіцієнтів корегувальних пристроїв.

✓ Опис вхідних та вихідних даних програми

Середовище візуального програмування GUIDE (Graphical User Interface Design Environment) передбачає, в першу чергу, проектування графічного інтерфейсу користувача, а вже потім безпосереднє програмування.

Для створення конкретного додатку елементи GUI перетягуються з панелі інструментів у вікно цього додатку. Після додавання елемента інтерфейсу необхідно задати його тег (ім'я), який буде ідентифікувати даний об'єкт серед інших об'єктів.

В GUI додатку для налаштування корегувальних пристроїв будуть розміщені:

- елемент інтерфейсу для виведення графіку перехідного процесу системи стабілізації;
- три слайдера для встановлення числових значень коефіцієнтів корегувальних пристроїв K_1 (П – складова), K_2 – (І – складова) та K_3 (Д – складова);
- шість елементів Edit Text для встановлення граничних значень цих коефіцієнтів (Max та Min);
- три текстових елементи Static Text для виведення поточних значень коефіцієнтів (Current);
- шість текстових елементів для відповідних надписів.

Граничні значення коефіцієнтів корегувального пристрою можуть бути встановлені експериментально. В роботі вони обрані з урахуванням отриманих значень в попередніх розділах.

Заготовка додатку з елементами інтерфейсу, що добавлені з панелі інструментів має вигляд, наведений на рис. 4.10.

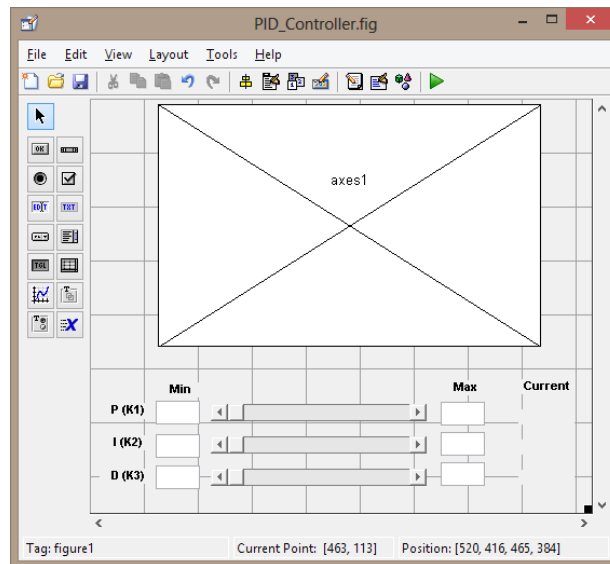


Рис. 4.10 Вікно заготовки додатку GUI

Розроблений графічний інтерфейс готовий до програмування.

✓ Лістинг програми

При збереженні графічного інтерфейсу MATLAB автоматично сформував для нього програмний код. Тому, після ініціалізаційного блоку цього коду розміщується основна частина команд розв'язуваної задачі:

```
function mySliderCallback(hObject, eventdata, handles)

%отримання max та min складових регулятора
max1=str2double(get(handles.edit1, 'String'));
max2=str2double(get(handles.edit2, 'String'));
max3=str2double(get(handles.edit3, 'String'));
min1=str2double(get(handles.edit4, 'String'));
min2=str2double(get(handles.edit5, 'String'));
min3=str2double(get(handles.edit6, 'String'));

%отримання значень зі слайдерів
c1=get(handles.slider1, 'Value');
c2=get(handles.slider2, 'Value');
c3=get(handles.slider3, 'Value');

%визначення поточних значень коефіцієнтів складових регулятора
cur1=min1+(max1-min1)*c1;
cur2=min2+(max2-min2)*c2;
cur3=min3+(max3-min3)*c3;

%виведення поточних значень коефіцієнтів
set(handles.text7, 'String', cur1);
```

```

set(handles.text8, 'String', cur2);
set(handles.text9, 'String', cur3);

%перехідна характеристика
axes(handles.axes1);
cla;
hold on;
grid on

%присвоєння коефіцієнтів регулятора
K1=cur1;
K2=cur2;
K3=cur3;

%параметри системи
Wob=tf([30],[0.01 0.2 1 0]);%об'єкт
Wg=tf([0.09],[0.01 1]);%підсилювач
N=100;
Wp=tf([K1/N+K3 K1+K2/N K2],[1/N 1 0]);%регулятор

W1=series(Wg, Wob);
W=series(Wp,W1);%передатна функція розімкнутої системи
sys=feedback(W,1);%передатна функція замкнутої системи

t=5;
step(sys,t)
grid on
xlabel('t');
ylabel('h');

```

Утворений програмний код доповнюється функціями звернення до слайдерів:

```

function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles)
mySliderCallback(hObject, eventdata, handles);
function slider2_Callback(hObject, eventdata, handles)
mySliderCallback(hObject, eventdata, handles);

function slider3_Callback(hObject, eventdata, handles)
mySliderCallback(hObject, eventdata, handles);

```

Незалежно від кількості слайдерів і їх тегів, згадана вище функція має один і той же вигляд для кожного слайдера.

✓ Опис інтерфейсу користувача

В результаті запуску описаного вище програмного коду відкривається діалогове вікно, що зображене на рис. 4.11.

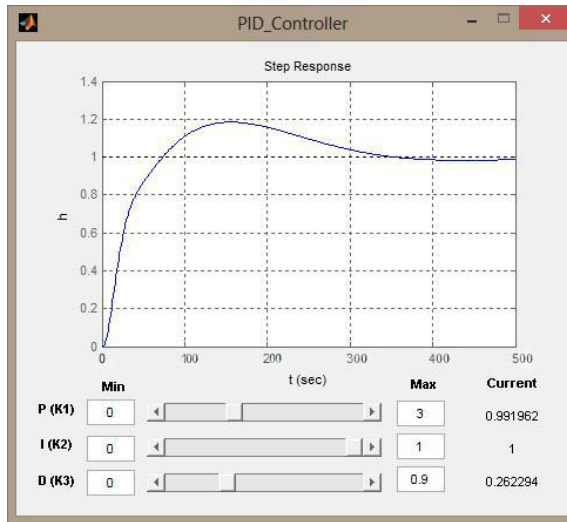


Рис. 4.11 Діалогове вікно інтерфейсу

Розроблений інтерфейс дозволяє переміщенням в діалоговому вікні движків слайдерів визначити (по виду отриманих перехідних характеристик) коефіцієнти корегувальних пристроїв.

На рис. 4.11 в якості прикладу приведена перехідна функція із встановленням слайдерів в положення, що відповідає оптимальним коефіцієнтам корегувального пристрою, отриманим в попередніх розділах.

Видаливши в М-файлі програми команду очистки поточного графіку «cla», можна отримати сімейство перехідних характеристик для будь-якої множини параметрів корегувальних пристроїв, що може бути зручним при виборі характеристики з бажаними показниками якості (рис. 4.12).

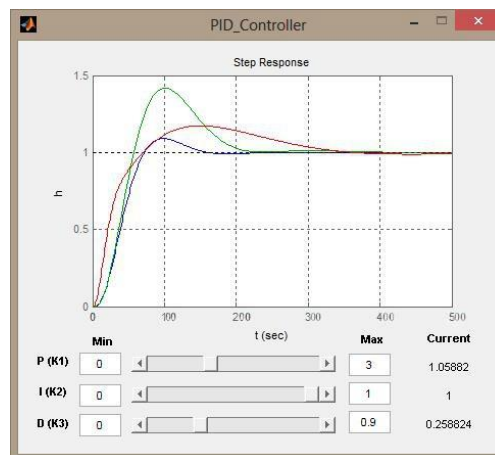


Рис. 4.12 Приклад сімейства характеристик

Графіки в діалоговому вікні можна відредагувати, викликавши редактор властивостей (Property Editor). Він також дозволяє позначити на графіку

перехідної функції основні показники якості: максимальне значення амплітуди, перерегулювання, усталене значення та час перехідного процесу.

Отже, розроблена програма налаштування коефіцієнтів корегувального пристрою в графічному інтерфейсі дозволяє оперативно розраховувати коефіцієнти корегувального пристрою системи стабілізації малого космічного апарату, видаляючи та комбінуючи необхідні канали.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційної роботі був проведений аналіз областей застосування слідкуючих систем автоматики. Він відображає різноманіття напрямків їх застосування при керуванні технічними системами.

Розроблено математичну модель слідкуючих систем та проведено її дослідження. На базі моделювання обґрунтовано корисність отримання системи автоматизованого синтезу.

Створено математичне забезпечення автоматизації розрахунків перехідних характеристик ПСС. Отримано алгоритми, які дозволяють за відомими показниками якості визначити будь-яку часову характеристику системи.

Дослідження виконані у середовищі MatLab на основі пакета прикладних програм Simulink.

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. – 443с.
3. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І. Теорія автоматичного управління. - К: Техніка, 2002. - 688с.
4. Аблесімов О.К. Теорія автоматичного керування. Методичні вказівки до лабораторних робіт. – К.: Принт-центр, 2019. – 110с.
5. Наумчук О. М. Основи систем автоматизованого проектування. – Рівне: НУВГП, 2008. – 136с.
6. Тимченко А. А. Основи системного проектування та системного аналізу складних об'єктів: Основи САПР та системного проектування складних об'єктів: Підручник / за ред.. В.І.Бикова.- 2-ге вид. – К.: Либідь, 2003. – 272 с.
7. Єщенко О.А. Основи САПР [Електронний ресурс]: конспект лекцій для студ. напряму 6.050503 “Машинобудування” ден. і заочн. форм навчання. / Єщенко О.А., Р.Л. Якобчук, Змієвський Ю.Г. – К.: НУХТ, 2014. – 205 с
8. Довідник по САПР/Пр. В.И.Скурихіна. -К.: Техніка, 1988.
9. Ч.Філліпс, Р. Харбор Системи управління зі зворотним зв'язком. : ЛБЗ, 2001. - 615с.
10. Р. Дорф, Р. Бішоп Сучасні системи управління. ЛБЗ, 2004. - 832с.
11. Дьяконов В. Simulink 4. Спеціальний довідник. Пітер, 2002. - 528с.
12. Крижанівська Ю. А. MatLAB для дискретних систем управління. ВДУ, 2005. - 27с.
13. Соколов Ю.М. Комп'ютерний аналіз і проектування систем управління. - Харків: ХАІ, 2010. - 343с.
14. Чабан Ю.М. Деякі питання суднової автоматики: конспект лекцій, Навчальний посібник, 2001 г. - 20 с.