

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни «Основи теорії автоматичного регулювання»
вибіркових компонент освітньо-професійної програми
освітньо-професійного ступеню перший (бакалаврський) рівень вищої освіти
272 Авіаційний транспорт
(Технології робіт та технологічне обладнання аеропортів)

за темою №2 – Системи регулювання витратою палива ГТД.

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 22.02.2024р. № 2

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного
коледжу Харківського
національного університету
внутрішніх справ
Протокол від 17.01.2024р №6

ПОГОДЖЕНО

Секцією науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 22.02.2024р. № 2

Розглянуто на засіданні циклової комісії технічного обслуговування
авіаційної техніки , протокол від 12.12.2023 р. № 8

Розробник:

*Викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки,
спеціаліст вищої категорії, Пономаренко А.В.*

Рецензенти:

- 1. Завідувач кафедри технологій аеропортів Національного авіаційного університету, доктор технічних наук, професор Тамаргазін О.А.*
- 2. Спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії аеронавігації Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Тягній В.Г.*

План лекції

1. Задачі, які вирішують системи подачі палива в КЗ ГТД. Режими роботи та програми керування ГТД.
2. Схеми регуляторів частоти обертання ротора двигуна.
3. Закони управління.

Література:

Основна

1. Черкасов Б.А. «Автоматика та регулювання повітряно-реактивних двигунів». К.: Машинобудування, 1988 - 360 с.
2. Кліментовській Ю.А. «Системи автоматичного управління силовими установками літальних апаратів». Київ: КВІЦА, 2001-400 с.
3. Гуревич О.С. Системи автоматичного управління авіаційними ГТД. К.: ТОРУС ПРЕС, 2011-208 с.
4. Кеба І.В. Конструкція і льотна експлуатація авіаційного двигуна ГТД 350. К.: Вища школа, 1987. 224 с.
5. Кулик М.С., Гвоздецький І.І. Ясиніцький Е.П. Системи автоматичного керування газотурбінних двигунів і газотурбінних установок. Підруч. – К: НАУ, 2009. – 364 с.

Допоміжна література:

6. Ранченко Г.С. Спосіб керування газотурбінним двигуном. ПАТ «Елемент», Одеса, 2013 р.
7. Волков Д.І. Спосіб керування дводвигуновою силовою установкою гелікоптера. ПАТ «Елемент», Одеса, 2013 р.
8. Кеба І.В. «Конструкція і льотна експлуатація вертолітного двигуна ТВ2-117А». К.: Вища школа, 1990- 230 с.
9. М.С.Кулик, О.А.Тамаргазін, В.В.Козлов. Конструкція, міцність та надійність газотурбінних установок і компресорів: підруч. – К.: НАУ, 2009. – 480 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

10. https://www.twirpx.com/files/science/transport/aircrafting/reference_helicopter_operation/
11. <https://profbook.com.ua/gasoturbinni-dvyguny.html>
12. <https://www.yakaboo.ua/ua/konstrukcija-micnist-ta-nadijnist-gazoturbinnih-ustanovok-i-kompresoriv.html>

Текст лекції

1. Завдання, які вирішуються системою керування витратами палива в основній камері згоряння.

Витрата палива в основну камеру згоряння G_v є основним керуючим фактором будь-якого авіаційного ГТД. Він характеризує підведення енергії до двигуна, яка в процесі послідовного перетворення в основній камері згоряння, турбіни і реактивному соплі забезпечує створення сили тяги ТРД і ТРДД або надлишкової потужності на валу ТВД, ТВВД і турбовальних ГТД.

Основними завданнями управління витратою палива є:

- стабілізація в висотно-швидкісних умовах заданого РУД режиму роботи турбокомпресорної частини ГТД відповідно до прийнятого закону управління;
- обмеження неприпустимих за запасами міцності і газодинамічної стійкості величин некерованих параметрів силової установки;
- запуск ГТД і його перекид з одного режиму на інший при швидкому переміщенні руд за найменший час при наявних обмеженнях;
- обмеження в висотних умовах на режимі польотного малого газу мінімальної витрати палива в основну камеру згоряння на заданому рівні, що забезпечує його задовільний розпил через форсунки і збереження по висоті певного часу прийомності ГТД;
- короткочасне підвищення запасу газодинамічної стійкості в процесі попередження і ліквідації помпажа.

2. Схеми регуляторів і закони управління.

Для ТРД в якості регульованої координати зазвичай вибирають частоту обертання ротора. Регулювання частоти обертання проводиться зміною витрати палива. Скористаємося принципом відхилень і застосуємо його для регулювання частоти обертання. При цьому регулятор матиме чутливий елемент, який вимірює частоту обертання ротора. При відхиленні частоти обертання від заданого значення чутливий елемент переміщенням регулюючого органу змінює подачу палива так, щоб задана частота обертання відновилася.

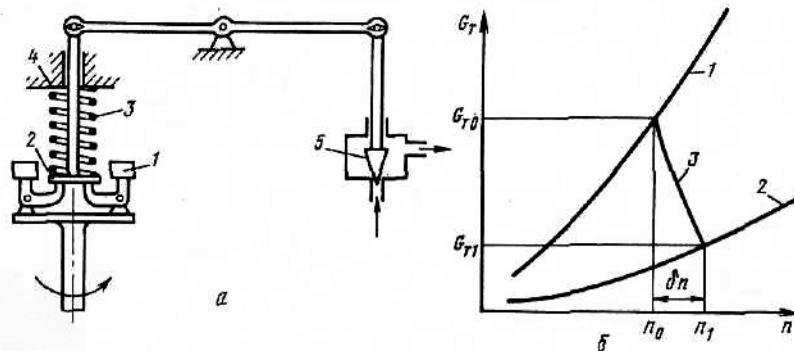
На прикладі схем регуляторів частоти обертання розглянемо коротко загальні принципи побудови регуляторів. Властивості, властиві цим схемам, зберігають свою силу і при регулюванні будь-яких інших параметрів.

СТАТИЧНИЙ РЕГУЛЯТОР ПРЯМОГО ДІЇ

Регулятором прямої дії називається регулятор, у якого чутливий елемент безпосередньо пов'язаний з регулюючим органом. Переміщення регулюючого органу відбувається за рахунок енергії самого чутливого елемента.

На рис. 2.3, а дана одна з можливих схем регулятора частоти обертання

прямої дії. Зі схеми видно, що чутливий елемент регулятора складається з шарнірно закріплених важків 1, муфти 2 і пружини 3.



При обертанні важків розвивається відцентрова сила, осьова складова якої переміщує муфту 2 і пов'язану з нею через важіль дозуючу паливну голку 5 (регулюючий орган). Положення муфти і дозуючої голки визначається рівністю осьової складової відцентрової сили і сили стиснення пружини. Для настройки регулятора на іншу частоту обертання переміщається упор пружини 4.

При переході до нової висоті або швидкості польоту змінюється момент опору на компресорі двигуна або, інакше кажучи, змінюється навантаження двигуна. Нової величиною навантаження повинен відповідати інший витрата палива, тобто інше положення дозуючої голки 5. Неважко переконатися, що регулятор, виконаний за цією схемою, при зміні навантаження не може точно підтримувати задану частоту обертання (вважаємо, що упор 4 пружини чутливого елемента не змінює свого положення). Дійсно, якщо у землі при витраті палива G_{T0} двигун працює з частотою обертання n_0 , тос переходом на висоту H_1 (вважаємо число Mn польоту незмінним) дозуюча голка повинна бути кілька опущена, що зменшить прохідний перетин і забезпечить витрата палива $G_{T1} < G_{T0}$. Переміщення на схемі голки вниз спричинить за собою переміщення муфти 2 вгору і деяке збільшення стиснення пружини 3. Однак додаткове стиснення пружини може статися тільки при збільшенні частоти обертання двигуна до n_1 . Таким чином, регулятор прямої дії не може підтримувати частоту обертання постійної при зміні зовнішніх умов.

Яка відповідає наведеному міркування характеристика $G_T(n)$ показана на рис. 2.3, б, де лінії 1 і 2 - необхідні витрати палива відповідно у землі і на висоті H_1 , лінія 3 - витрата палива, підтримуваний регулятором:

$$G_T = do(a - \beta n), \quad (2.1)$$

де a - фактор режиму двигуна, величина якого залежить від положення задає елемента регулятора; β - коефіцієнт посилення тахометра; do - коефіцієнт

пропорційності, який в загальному випадку може бути пов'язаний з іншими параметрами робочого процесу, наприклад, з тиском за компресором $p \cdot K$.

Величина $p = p_1 - p_0$ називається статичною помилкою регулювання, а регулятор - статичним. Статичний регулятор прямої дії простий за своїм устроєм; це є його головною перевагою. До недоліків регуляторів цього типу відносяться, по-перше, необхідність збільшення маси важків і, отже, розмірів регулятора для отримання чималих перестановки зусиль на регулюючому органі і, по-друге, статична помилка регулювання, зростаюча тим сильніше, чим більше змінюється навантаження на двигун.

АСТАТИЧНИЙ РЕГУЛЯТОР НЕПРЯМОЇ ДІЇ

Регулятором непрямої дії називається регулятор, у якого зв'язок між чутливим елементом і виконавчим органом осується через проміжний елемент, так що виконавчий орган переміщується за рахунок енергії будь-якого стороннього джерела.

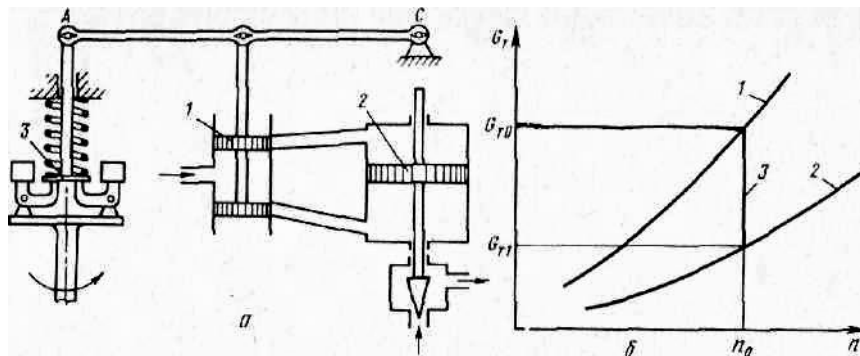


Рис. 2.4

Схема астатичного регулятора частоти обертання непрямої дії показана на рис. 2.4, д. Чутливий елемент регулятора пов'язаний з золотником 1 гідравлічного поршневого серводвигуна. На схемі золотник перебуває в нейтральному положенні, яке відповідає рівноважній частоті обертання. Поршень сервомотора 2 з чутливим елементом жорстко пов'язаний і при даному положенні муфти чутливого елемента 3 може займати будь-яке положення. Це означає, що регулятор, виконаний за цією схемою, здатний підтримувати задану частоту обертання при різних навантаженнях двигуна. Його видаткова характеристика $G_T(n)$ показана на рис. 2.4, б. Лінії 1 та 2 - необхідні витрати палива у землі і на висоті H_1 ; лінія 3 - витрата палива, підтримуваний регулятором. При відхиленні режиму роботи двигуна від рівноважного, наприклад, в бік збільшення частоти обертання, під дією надлишкової сили муфта чутливого елемента, переміщуючись вгору, повертає важіль АС щодо точки С. змістити вгору золотник 1 відкриває доступ робочої

рідини у верхню порожнину циліндра серводвигуна, поршень і дозуюча голка починають рух вниз, подача палива зменшується і частота обертання двигуна також зменшується.

У астатичного регулятора непрямої дії немає недоліків, властивих регулятору, зображеному на рис. 2.3, а: відсутня статична помилка регулювання, великі перестановки зусилля на дозуючій голці можуть бути отримані при невеликих розмірах чутливого елемента і всього регулятора. Однак відсутність безпосереднього зв'язку між чутливим елементом і дозуючою голкою ускладнює регулювання.

Зазвичай процес регулювання при зміні настройки регулятора даної схеми або навантаження двигуна носить повільно затухаючий коливальний характер. Це пов'язано з тим, що внаслідок інерційності махових мас турбіни і компресора зміна частоти обертання ротора двигуна відстає від зміни витрати палива; негативно позначаються також і вплив сили сухого (кулонівського) тертя в елементах регулятора. Для поліпшення процесу регулювання в регуляторі непрямої дії потрібно зв'язати поршень серводвигуна з золотником і контролювати рух дозуючої голки, як це зроблено в регуляторі з жорсткою зворотним зв'язком

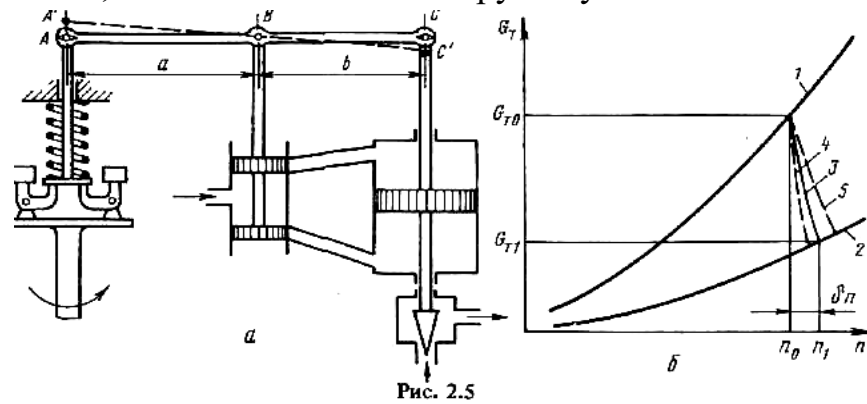
СТАТИЧНИЙ РЕГУЛЯТОР НЕПРЯМОГО ДІЇ (РЕГУЛЯТОР З ЖОРСТКОЇ ЗВОРОТНЬОГО ЗВ'ЯЗКОМ)

Схема такого регулятора частоти обертання показана на рис. 2.5, а. Вона є подальшим розвитком схеми астатичного регулятора непрямої дії. На відхилення режиму роботи двигуна від рівноважного чутливий елемент, золотник і дозуюча голка реагують так само, як у астатичного регулятора непрямої дії. Однак тут рух поршня серводвигуна не залишається безконтрольним. Шток поршня захоплює за собою важіль АС, і золотник, пов'язаний з важелем АС, зменшує перетин щілини підведення робочої рідини до серводвигунів, наближаючись до нейтрального положення. Процес регулювання швидко закінчується.

Неважко переконатися, що поліпшення динамічних характеристик двигуна з регулятором даної схеми досягається ціною статичної помилки регулювання. Для підтвердження цього уявімо собі розташування деталей регулятора при фіксованому упорі пружини для двох режимів роботи двигуна: у землі з великою витратою палива і на висоті - з малою витратою.

Коли закінчується процес регулювання, золотник займає нейтральне положення, перекриваючи своїми пасками обидва канали, що зв'язують порожнини циліндра серводвигуна з каналом підведення робочої рідини. Отже, на різних сталих режимах роботи двигуна точка В важеля АС займає одне і те ж положення. Зі збільшенням висоти польоту для зменшення подачі

палива дозуюча голка повинна опуститися, опуститься і точка С важеля АС до положення С ". При незмінному положенні точки В точка А важеля АС піднімається до положення А ', разом з важелем переміститься вгору і муфта чутливого елемента, сильніше стискаючи пружину.



Таке переміщення дозуючої голки, важеля і муфти може статися тільки в тому випадку, якщо частота обертання двигуна дещо збільшиться і з'явиться надлишкова відцентрова сила, що стискає пружину. Отже, при незмінній налаштування регулятора з жорсткою зворотним зв'язком зростання висоти польоту (зменшення навантаження двигуна) призводить до збільшення частоти обертання. Очевидно, що зростання швидкості польоту при незмінній висоті (збільшення навантаження двигуна) знизить частоту обертання. Відповідна цим міркуванням видаткова характеристика $G_T(n)$ наведена на рис. 2.5, б. Тут лінії 1 і 2 - необхідні витрати палива відповідно у землі і на висоті H_1 ; лінія 3 - витрата палива, підтримуваний регулятором; $n = n_1 - n_0$ - статична помилка регулювання.

Якщо змінити співвідношення плечей важеля АС, то це відіб'ється і на статичній, і на динамічній характеристики регулятора. Так, якщо при незмінній довжині важеля АЗ зменшити плече АВ то статична помилка регулювання знизиться (лінія 4). Процес регулювання буде більш тривалим і може прийняти коливальний характер. Регулятор за своїми характеристиками буде наближатися до Астатична регулятору. При збільшенні плеча АВ (довжина важеля АС залишається незмінною) статична помилка зростає (лінія 5); процес регулювання буде швидко закінчуватися.

ІЗОДРОМНИЙ РЕГУЛЯТОР

Вже згадана схема ізодромного регулятора частоти обертання (рис. 2.6) є подальшим розвитком схеми регулятора з жорсткою зворотним зв'язком. Вона поєднує в собі переваги астатичного регулятора і регулятора з жорсткою зворотним зв'язком: відсутність статичної помилки регулювання,

хороші динамічні характеристики при вдало обраних параметрах регулятора. Зі схеми випливає, що в ізодромного регуляторі жорсткої зворотного зв'язку між поршнем серводвигуна і золотником немає. Поршень серводвигуна з'єднаний з важелем АЗ не безпосередньо, а через спеціальний пристрій, що носить назву катаракт. В даній схемі катаракт складається з поршня 2, пов'язаного з важелем АС циліндра 1, з'єднаного з поршнем серводвигуна, і пружини 4, яка працює як на стиск, так і на розтягнення. Циліндр катаракта заповнений в'язкою рідиною (паливом, маслом), його порожнини по обидві сторони поршня 2 з'єднані між собою каналом, в який поміщений жиклер 3. На початку процесу регулювання ізодромний регулятор поводить себе як статичний регулятор. При відхиленні режиму двигуна від рівноважного, наприклад: поршень серводвигуна почне переміщатися вниз і захопить за собою важіль АС так само, як в регуляторі з жорсткою зворотним зв'язком. Золотник наблизитиметься до нейтрального положення.

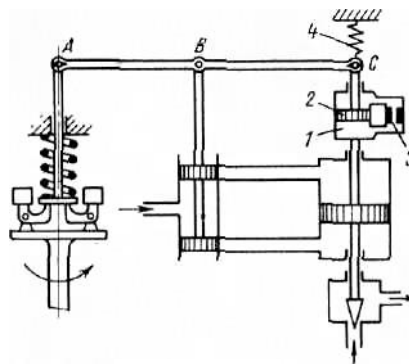


Рис. 2.6

Однак на цьому процес регулювання не закінчиться. При русі точки С важеля АС вниз розтягнеться пружина 4 і на поршні 2 виникне перепад тисків. Під дією цього перепаду рідина через жиклер 3 буде перетікати з верхньої порожнини циліндра в нижню. Розтягнута пружина 4, стискаючи, кілька підніме важіль і золотник, в результаті чого поршень серводвигуна і дозуюча голка перемістяться ще трохи вниз.

Подібні міркування можна продовжити і для подальшого вдосконалення, двигун поступово буде наблизитися до рівноважного режиму роботи. Поршень серводвигуна і пов'язана з ним дозуюча голка в процесі регулювання при зміні навантаження спочатку більшу частину свого шляху проходять швидко, а залишок шляху при наближенні до нового рівноважного режиму порівняно повільно.

Неважко переконатися, що після закінчення процесу регулювання статична помилка буде повністю ліквідована. При зміні навантаження на новому рівноважному режимі двигуна золотник і пружина катаракта займуть

нейтральне положення, поршень серводвигуна і дозуюча голка змістяться, а положення поршня катаракта щодо його циліндра зміниться.

Динамічну характеристику ізодромного регулятора можна наблизити як до характеристик статичного, так і астатичного регуляторів. Якщо зменшувати перетин жиклера 3 або знижувати жорсткість пружини 4, то ізодромний регулятор буде наближатися до статичного, а час, необхідний для зняття статичної помилки регулювання, буде збільшуватися. У межі, заглушивши жиклер 3 і знявши пружину 4, отримаємо статичний регулятор з жорсткою зворотним зв'язком, подібний розглянутому вище.

При зменшенні опору жиклера 3 і збільшенні жорсткості пружини 4 регулятор за своїми властивостями наближається до Астатична і стає їм при закріпленні на шарнірі точки С важеля АС і видаленні катаракта.

Рівняння витрати (2.2) справедливо і для ізодромного регулятора.

Динамічні характеристики регуляторів різних схем розглядалися в припущенні, що дії регулятора кожен раз спрямовані на усунення впливу зовнішніх збурень і змінилася навантаження і призводять регульований параметр об'єкта до заданої величини. Насправді так буває не завжди. Невдало вибрані параметри регулятора або не враховане вплив сухого (кулонівського) тертя може привести до повільно загасаючим коливань регульованої координати або навіть до коливань з наростаючою амплітудою.

РЕГУЛЯТОР НЕПРЯМОГО ДІЇ З РЕГУЛЮВАННЯМ ПО ЧАСТОТІ ОБЕРТАННЯ ТА КУТОВОМУ ПРИСКОРЕННЮ

У раніше розглянутих схемах ефективно втручання регулятора в роботу двигуна починається лише тоді, коли за рахунок надлишкової сили, що розвивається тягарцями, долаються сили тертя в механізмі регулятора і чутливий елемент переміщається на деяку величину від початкового положення.

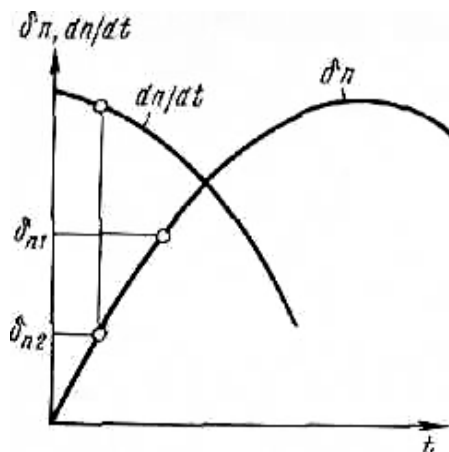


Рис 2.7

Існують регулятори, які реагують як на відхилення (змiна) координати, так і на швидкість її змiни. Стосовно до регулювання частоти обертання такий регулятор змiнює подачу палива при відхиленні кутової швидкості і появі кутового прискорення. Це дає можливість зменшити відхилення регульованої координати на початку процесу регулювання. Пояснимо сказане за допомогою характеристик, показаних на рис. 2.7.

Припустимо що у двигуна, що працює без регулятора, спостерігаються коливання кутової швидкості по синусоїді відносно заданого статичного режиму (крива δ_n). Регулятор повинен гасити ці коливання, але щоб він вступив в дію, потрібно деяке початкове відхилення частоти обертання (нехай це буде δ_{n1}). При відхиленні частоти обертання по синусоїді виникає кутове прискорення, змiнюється по косинусоїд (крива $d\delta_n / dt$); воно буде найбільшим в початковий момент, коли $\delta_n = 0$.

Якщо в регуляторі зробити два паралельних чутливих елемента, реагують на δ_n і $d\delta_n / dt$, то для ефективної дії регулятора буде потрібно менше початкове відхилення частоти обертання ($\delta_{n2} < \delta_{n1}$). Чутливі елементи, що реагують на кутовий прискорення, називаються акселерометрами. Регулювання частоти обертання або будь-якого іншого параметра робочого процесу по відхиленню і по похідною легше здійснити при використанні електричних регуляторів. Однак можуть бути застосовані і гідромеханічні елементи.

Додатковий вплив по похідною з тим же ефектом поліпшення динамічних характеристик регулювання можна замінити регулюванням по навантаженню. Для ГТД навантаження визначається величиною крутного моменту на валу ротора. Однак регулювання частоти обертання двигуна тільки за величиною навантаження або по кутовому прискоренню неможливо. Це пояснюється тим, що один і той же кутовий прискорення може спостерігатися при різних частотах обертання, а однією і тією ж навантаженні (одного й того ж моменту, що крутить) при змiні швидкостей і висот польоту відповідатимуть різні частоти обертання двигуна.

3. Закони управління.

Законом управління будемо називати математичну залежність, відповідно до якої регулятор виробляє котра управляє вплив. Зупинимось на найбільш поширених законах, що реалізуються в лінійних регуляторах систем управління, в яких використовується принцип відхилення .:

-*пропорціональний* закон: регулятори, які здійснюють цей закон, називаються П-регуляторами. До них відносяться регулятори прямої дії і з жорсткою зворотним зв'язком.

-*інтегральний* закон (І-регулятор): Цей закон здійснюється в астатичних регуляторах і забезпечує Астатичне регулювання, так як процес регулювання закінчується тільки тоді, коли відхилення (помилка регулювання) $e = 0$.

-*пропорціонально-інтегральний* закон (ПІ-регулятор): Цей закон здійснюється в ізодромного регуляторах і також забезпечує астатичне регулювання.

-*пропорціонально-інтегрально-диференціальний* закон (ПІД-регулятор): Цей закон забезпечує астатичне регулювання.