

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

**Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки**

## **ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни  
«Системи та обладнання авіаційної техніки»  
вибіркових компонент  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт (Аеронавігація)***

**за темою №10 - Системи автоматичного керування**

**Кременчук 2023**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023р. № 7

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного  
коледжу Харківського  
національного університету  
внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.2023р. № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023р. № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, протокол від 28.08.2023р. № 1

**Розробники:**

- 1. Викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Царенко Андрій Олександрович*
- 2. Викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, спеціаліст вищої категорії Пономаренко Анатолій Володимирович.*

**Рецензенти:**

- 1. Завідувач кафедри технологій аеропортів Національного авіаційного університету, д.т.н., професор Тамаргазін О.А.*
- 2. Професор циклової комісії аеронавігації КЛК ХНУВС, к.т.н., с.н.с. Тягній В.Г.*

### **План лекції**

1. Призначення та вимоги до систем автоматичного регулювання.
2. Принципи управління енергетичними об'єктами.
3. Елементи регулятора.
4. Регульовані параметри та регулюючі фактори.
5. Програми регулювання ГТД.
6. Типи систем регулювання.

### **Рекомендована література:**

#### **Основна:**

1. Кулик М.С., Тамаргазін О.А. Конструкція, міцність та надійність газотурбінних установок і компресорів. Київ: НАУ, 2009. 477 с.
2. Терещенко Ю.М. Газотурбінні двигуни літальних апаратів, Київ: Вища школа, 2000. 319 с.
3. Царенко А.О., Шмельов Ю.М. Модуль 15. Газотурбінний двигун (категорія В1). Конспект лекцій. Кременчук: КЛК ХНУВС, 2019. 810 с.

#### **Допоміжна:**

4. Aviation Maintenance Technician. Handbook–Powerplant. Volume 1.U.S. Department of Transportation. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Flight Standards Service, 2012. 282 p.
5. Aviation Maintenance Technician. Handbook–Powerplant. Volume 2.U.S. Department of Transportation. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Flight Standards Service, 2012. 280 p.

#### **Інформаційні ресурси в Інтернеті**

6. Aviation Maintenance Technician. Handbook–Powerplant. U.S. Department of Transportation. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Flight Standards Service, 2023. 500 p. URL.:[https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/amt\\_powerplant\\_handbook.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/amt_powerplant_handbook.pdf) (дата звернення 26.08.2023)
7. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION: Helicopter Flying Handbook. URL.:[https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/helicopter\\_flying\\_handbook](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/helicopter_flying_handbook) (дата звернення 26.08.2023)
8. L'AVIONNAIRE: LES TURBOMACHINES. URL.: <https://lavionnaire.fr/MotorIntro.php> (дата звернення 26.08.2023)

### **Текст лекції**

#### **1. Призначення та вимоги до систем автоматичного регулювання.**

Сучасний ГТД забезпечується складними системами управління і регулювання. Система управління дозволяє задавати режим роботи двигуна в

процесі його експлуатації для отримання бажаних значень тяги (потужності) і питомої витрати палива. Управління може бути ручним або автоматичним. На пілотованих літаках ручне управління зводиться до важеля керування двигуном (РУД), яким задається необхідний режим. Управління двигуном зводиться до впливу на параметри його робочого процесу.

Під режимом роботи двигуна розуміється певна сукупність параметрів робочого процесу, при яких працює двигун. До них відносяться: частота обертання ротора  $n$ ; температура газу перед турбіною  $T^*_Г$ ; ступінь підвищення тиску компресора  $\pi_k$ ; ступінь розширення газу в турбіні  $\pi_t$ ; коефіцієнти корисної дії компресора  $\eta_k$  і турбіни  $\eta_t$ ; кількість повітря, що надходить у двигун  $G_B$  і ін.

Вплив автоматичних пристроїв на параметри робочого процесу називається регулюванням двигуна. Враховуючи велику кількість параметрів, що визначають режим роботи двигуна, і складні взаємозв'язки між ними, застосовують автоматичне регулювання тільки основних параметрів ( $\pi_{дв}$  і  $T^*_Г$ ), які в основному визначають тягу, розвивається двигуном, питома витрата палива та навантаження, що діють на основні деталі двигуна.

Система автоматичного регулювання (САР) забезпечує підтримку заданого режиму роботи двигуна при зміні зовнішніх умов: висоти, швидкості польоту, температури і тиску навколишнього середовища. Завдяки цьому пілот звільняється від необхідності підтримки заданого режиму двигуна, істотно полегшується управління, збільшуються надійність і економічність двигуна. Крім того, САР при завданні нового режиму забезпечує його зміна за певним бажаного закону.

САР являє собою сукупність автоматичного регулятора з двигуном. Регулятор завжди включає чутливі елементи, що сприймають всяка зміна режиму роботи двигуна і умов польоту, і регулюючий орган, що впливає на регулюючі чинники (подача палива, площа на зрізі сопла, кут установки лопатей гвинта) з метою відновлення заданого режиму. Двигун в САР є об'єктом регулювання.

САР повинна забезпечувати:

- Найвигідніше використання двигуна, т. е. отримання найбільшої тяги (потужності) на максимальному режимі та найменшого питомого витрати палива на крейсерських режимах;
- Безпечну роботу двигуна, т. е. за умовами міцності і надійності запобігати можливість перевищення основних параметрів  $\pi_{дв}$  і  $T^*_Г$ , встановлювати беспомпажну роботу компресора і стійку роботу камери згоряння при швидко мінливих умовах експлуатації;
- Хорошу прийомистість двигуна, т. е. встановлювати таку подачу палива, при якій затрачається мінімальний час надійного переходу двигуна з одного режиму на інший при різкому переміщенні РУД від себе або на себе;
- Високу точність регулювання основних параметрів, а саме частоту обертання ротора і з точністю 0,2 ... 0,3% від номінальної частоти обертання, а  $T^*_Г$  з точністю 20 ... 30 ° С. Це пояснюється сильним впливом  $\pi$  і  $T^*_Г$  на тягу

(потужність) двигуна, міцність його елементів і питома витрата палива. Наприклад, зменшення частоти обертання на 1% від злітних значень призводить до зменшення тяги на 4 ... 5%, а збільшення  $T \cdot g$  на 1% викликає зменшення запасу міцності лопаток турбіни на 3 ... 4%;

- надійний автоматичний запуск за час, що не перевищує 120 с;
- стійку роботу двигуна на режимі малого газу, перехідних режимах і на великих висотах.
- під стійкістю розуміється здатність двигуна при даних зовнішніх умовах і незмінному положенні РУД зберігати з плином часу задану частоту обертання ротора.

## 2. Принципи управління енергетичними об'єктами

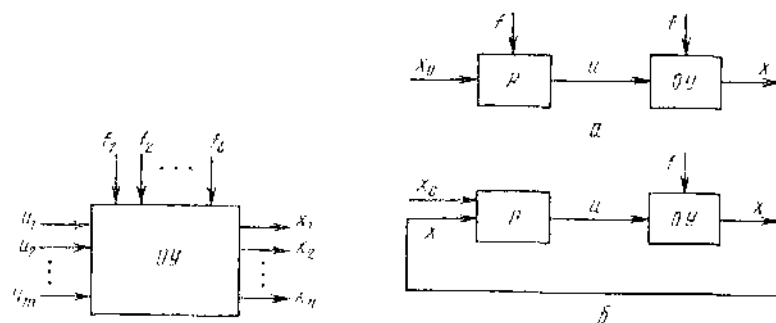
Всякий енергетичний процес характеризується сукупністю фізичних величин, які називаються координатами або параметрами процесу. Сукупність технічних засобів, що виконують даний енергетичний процес, є об'єктом управління. Для управління об'єктом деякі з його координат - керовані координати - повинні підтримуватися постійними або змінюватися за певним законом. Необхідність управління значеннями координат виникає внаслідок того, що нормальний хід процесу порушується різного роду збуреннями - зміною навантаження, впливом зовнішнього середовища, зміною характеристик елементів та іншими збуреннями.

На Рис.1 зображена схема об'єкта управління (ОУ). На цій схемі  $x_1, x_2, \dots, x_n$  - керовані і спостережувані координати або вихідні величини об'єкта;  $f_1, f_2, \dots, f_n$  - впливи;  $u_1, u_2, \dots, u_m$  - управляючі дії, за допомогою яких через керуючі органи об'єкта відбувається зміна керованих координат. Управління об'єктом здійснюється без безпосередньої участі людини, за допомогою спеціально для цієї мети приєднаних приладів, які називаються автоматичними регуляторами (Р). Сукупність засобів управління і об'єкта утворюють систему автоматичного управління (САУ) або в більш вузькому понятті систему автоматичного регулювання (САР).

У техніці широко використовуються два фундаментальних принципи управління: принцип компенсації (управління по обуренню) і принцип управління за відхиленням. Для з'ясування цих принципів на Рис.11.1 наведені схеми, на яких  $x_0$  задане значення регульованої координати.

Принцип компенсації (Рис. 1, а). Для підтримки постійного значення координати  $x = x_0$  вимірюються обурення  $f$  вносяться корективи в управлінський вплив  $u$ . Очевидно, в принципі можна підібрати таке значення  $u$  щоб в сталім режимі відхилення було відсутнє:  $\Delta x = x_0 - x = 0$ . Однак слід мати на увазі, що не завжди можна передбачити всі джерела збурень та їх виміряти.

Регулювання по відхиленню (Рис.4.1, б). Замість вимірювання збурень



обмежуються виміром регульованої координати  $x$ . Вплив на об'єкт відбувається залежно від відхилення цієї координати від заданого значення. Очевидно, що регульована координата не може підтримуватися абсолютно точно, так як тільки її відхилення від заданого значення  $x_0$  викликає керований вплив на об'єкт. Зв'язок між об'єктом регулювання і регулятором є від'ємним зворотним зв'язком, а сам принцип регулювання називається також замкнутим регулюванням. Відхилення  $\Delta x = x_0 - x$  є помилкою регулювання.

Рис.1 Принципи управління енергетичними об'єктами

В кінці процесу регулювання це відхилення може бути отримано як завгодно малим. Точність регулювання по відхиленню вище, ніж при регулюванні компенсацією збурень, тому принцип регулювання по відхиленню знайшов широке застосування.

Можливе застосування комбінованого регулювання по обуренню і відхиленню. Комбіновані регулятори об'єднують гідності обох принципів: досягається швидкість реакції на зміну обурень і точне регулювання.

### 3. Елементи регулятора

Більшість САР авіаційних силових установок відноситься або до систем стабілізації, або до систем програмного управління. Системи стабілізації призначені для підтримки постійного значення регульованої координати  $x_0(t) = \text{const}$ . В системах програмного керування мається програмний пристрій, що виробляє величину  $x_0(t)$ .

Розглянемо структуру та елементи регулятора, що працює в режимі стабілізації. При замкнутому регулюванні будь-якої координати, яка визначає робочий режим двигуна, від регулятора потрібно, щоб він стійко підтримував її задане значення і швидко без великих коливань відновлював це значення, коли відбулося відхилення від усталеного режиму роботи.

При замкнутому регулюванні регулятором називається пристрій, що вимірює відхилення регульованої координати і виробляє вплив, величина якого залежить від вимірюваного відхилення. Регулятор має вимірювальний (чутливий) елемент, регулюючий орган і що пов'язує їх проміжне передавальне пристрій. Перерахуємо елементи, з яких в принципі складається будь регулятор.

Чутливі елементи вимірюють величину регульованої координати або обурювального впливу. Потужність їх більше потужності чутливих органів вимірювальних приладів, так як зазвичай вони приводять в дію наступний елемент регулятора. Особливо це відноситься до чутливих елементів регуляторів прямої дії.

Задавальні елементи змінюють настройку регулятора, задаючи значення регульованої координати.

Порівнювальні елементи служать для виявлення різниці двох величин, з яких одна може задаватися механізмом налаштування, а інша визначається

положенням регулюючого органу.

Перетворювальними елементами прийнято називати спеціальні елементи, призначені для перетворення однієї фізичної величини в іншу без повідомлення додаткової енергії. Наприклад, в ємнісному перетворювачі кут повороту пластини перетворюється в ємність між пластинами. Перетворення відбувається і в чутливому елементі. Так, якщо вироблена ним фізична величина незручна з яких-небудь причин для подальшого використання, то в регулятор вводять перетворювач.

В підсилюючих пристроях сигнал порівняння, рівний різниці вимірної і заданої величин, впливає на керуючий елемент підсилювача, в результаті чого відбувається посилення сигналу, що передається на його силові елементи. В гідромеханічних регуляторах силовими елементами звичайно є поршневі гідравлічні серводвигуни, в електричних регуляторах електродвигуни.

Регулюючі органи переміщуються силовими елементами і змінюють енергетичний стан об'єкта регулювання так, що величина регульованої координати наближається до заданого значення.

Стабілізуючі пристрої служать для гасіння коливань регульованої величини в процесі її регулювання. В гідромеханічних регуляторах стабілізуючі пристрої часто виконуються у вигляді жорстких і ізодромних зворотних зв'язків. Рідинні заспокоювачі (демпфери) сприяють гасінню коливань тих ланок, які володіють значною масою. Зворотні зв'язки між регулюючим органом або силовим елементом підсилювача і його керуючим елементом призводять до "попереднього відключення" гідро-або електродвигуна, що сприяє загасанню коливань регульованої величини.

Регулювання може вестися або тільки за величиною координати (параметру робочого процесу двигуна), або по величині координати і величиною її похідної за часом. При цьому в регуляторі повинен бути другий чутливий елемент, який вимірює швидкість зміни координати.

Окремі елементи регулятора, наприклад, чутливий елемент, задавальний і порівнювальний пристрої, конструктивно можуть бути об'єднані в одному вузлі. В регуляторах деяких типів відсутні підсилювачі або стабілізуючі елементи.

## **5. Регульовані параметри та регулюючі фактори.**

Програма регулювання встановлює закон зміни основних параметрів двигуна при зміні його режиму і зовнішніх умов ( $P_n^*$ ,  $T_n^*$ ).

Режим роботи ГТД визначається багатьма взаємопов'язаними параметрами, які поділяють на основні (регульовані) та допоміжні (нерегульовані).

Регульованими параметрами є ті, які найбільш ефективно впливають на режим роботи двигуна і значення яких легко змиритися і контролюється простими надійними і малоінерційними датчиками. Такими параметрами у ГТД є частота обертання ротора і температура газів перед турбіною. Саме ці параметри визначають тягу (потужність), економічність і надійність двигуна. Тому вони задаються системою управління і підтримуються постійними або змінюються за

певним законом САР за допомогою регулюючих факторів.

## 6. Програми регулювання ГТД.

На експлуатованих ГТД знайшли застосування в основному два типи програм регулювання:

Програми регулювання першого типу характеризуються тим, що частота обертання ротора зберігається постійною при зміні зовнішніх умов за рахунок автоматичної зміни  $T_{\Gamma}^*$  при незмінній геометрії проточної частини двигуна, тобто вони вимагають:

$$n_{\max} = \text{const}, F_{p.c} = \text{const}, T_3 \neq \text{const},$$

$p_c$  - площа на зрізі реактивного сопла.

Таке регулювання застосовується для ТРД, у яких геометрія проточної частини не змінюється. Регульованим параметром є частота обертання ротора, регулюючим фактором - подача палива  $G_T$ , а температура  $T_{\Gamma}^*$  регулюється опосередковано через  $n$ .

Програма регулювання другого типу, згідно з якою:

$$n = \text{const}; T_{\Gamma}^* = \text{const}; F_{p.c} \neq \text{const}.$$

застосовується для ТРД, у яких геометрія проточної частини змінюється, що неминує веде до його конструктивного ускладнення. САР в цьому випадку має два регулюючих фактора, а регулятор забезпечений двома регулюючими органами. Це дозволяє дещо знизити питому витрату палива (на 3 ... 4%) і найбільш повно використовувати двигун по  $T_{\Gamma}^*$  за рахунок більш раціонального співвідношення між  $n$  і  $T_{\Gamma}^*$ . Системи регулювання ГТД з форсажними камерами передбачають регулювання площі критичного перетину реактивного сопла, так як при включенні форсажу необхідно зберегти значення  $\pi_T$  і не допустити закид температури  $T_{\Gamma}^*$ .

## 7. Типи систем регулювання.

По способу об'єднання різних типів регуляторів САК ГТД можуть бути:

- гідроелектронні, у яких всі основні функції регулювання здійснюються за допомогою гідромеханічних лічильно-вирішувальних пристроїв, і тільки для виконання деяких функцій (обмеження температури газу, частоти обертання ротора турбокомпресора й ін.) використовуються електронні регулятори;

- супервізорні, у яких електронні регулятори використовуються для корекції в обмеженій області роботи гідромеханічних регуляторів, що безпосередньо впливають на виконавчі органи;

- електронно-гідравлічні, у яких основні функції регулювання здійснюються за допомогою електронних пристроїв (аналогових або цифрових), а окремі функції – за допомогою гідромеханічних і пневматичних регуляторів;



- повністю електронні системи, у яких всі функції регулювання виконуються засобами електронної техніки, а виконавчі органи можуть бути гідромеханічними або пневматичними.