

**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 №4 – Електронні системи керування витратою палива ГТД

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. Основні поняття про електронні системи керування, подачі палива в камери згоряння ГТД.
2. Особливості структури систем керування витратою палива з електронними регуляторами.
3. Бортові аналогові керуючі машини.
4. Бортові цифрові керуючі машини.
5. Ефективність застосування електронного регулятора для вертолїтного ГТД.

Лїтература:

Основна

1. Черкасов Б.А. «Автоматика та регулювання повітряно-реактивних двигунів». К.: Машинобудування, 1988 - 360 с.
2. Кліментовський Ю.А. «Системи автоматичного управління силовими установками лїтальних апаратів». Київ: КВЦА, 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. Ясинїцький Е.П. Системи автоматичного керування газотурбінних двигунів і газотурбінних установок. Підруч. – К: НАУ, 2009. – 364 с.

Допомїжна лїтература:

6. Ранченко Г.С. Спосїб керування газотурбінним двигуном. ПАТ «Елемент», Одеса, 2013 р.
7. Волков Д.І. Спосїб керування дводвигуновою силовою установкою гелїкоптера. ПАТ «Елемент», Одеса, 2013 р.
8. Кеба І.В. «Конструкція і льотна експлуатація вертолїтного двигуна ТВ2-117А». К.: Вища школа, 1990- 230 с.
9. М.С.Кулик, О.А.Тамаргазїн, В.В.Козлов. Конструкція, мїцнїсть та надїйнїсть газотурбїнних установок і компресорїв: пїдруч. – К.: НАУ, 2009. – 480 с.

Інформаційні ресурси в Інтернетї

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. Загальні відомості про електронні системах управління витратою палива

Вимоги до підвищення лобової тяги силових установок летального апарату, зниження їх питомої маси і питомої витрати палива викликає необхідність збільшення основних розрахункових параметрів робочого процесу ГТД. При цьому зростають вимоги до точності їх регулювання особливо на режимах роботи, на яких вони досягають граничних значень. Можливості гідромеханічних систем автоматичного управління в забезпеченні цих вимог при прийнятній вартості їх виробництва і експлуатації досить обмежені. Це зумовило широке використання в системах автоматичного управління сучасних ГТД електронних регуляторів, які виконуються на базі аналогових або цифрових обчислювальних машин. Електронні регулятори в канал управління паливом зазвичай включаються спільно з гідромеханічними регуляторами, які на максимальних режимах роботи турбокомпресорів ГТД дублює роботу електронних регуляторів, тобто є резервними. Обидва типи регуляторів в системи управління паливом включаються паралельно і мають загальні приводи дросельних кранів. В існуючій технічній літературі під електронним регулятором системи управління витратою палива розуміється тільки електронна частина всього регулятора, що включає крім неї ще й гідропривід дросельного крана. З огляду на це, електронний регулятор в системі управління витратою палива повинен виконувати функції вимірювача неузгодженості, корекції сформованого сигналу, його посилення і перетворення до виду, зручного для управління гідроприводом дросельного крана. Зазвичай в електронному регуляторі використовується широтно-імпульсна модуляція сигналу, для чого в ньому передбачається спеціальний блок широтно-імпульсної модуляції. При цьому на його виході формується імпульсна напруга постійної амплітуди (UA) та частоти f (рис.4.1), шпаруватість якого залежить від неузгодженості ΔX (рис.4.2).

Величина скважности визначається за виразом

$$\Psi_{PT} = \frac{\tau}{T} 100 \%,$$

де τ - тривалість імпульсів (см.рис.4.1), що залежить від параметра X ; T - період проходження імпульсів ($T = 1 / f$); f - частота імпульсів.

Шпаруватість керуючого сигналу, що дорівнює 50%, яка виходить при $\Delta X = 0$, називається рівноважною і позначається Ψ_{PT} . Для перетворення сформованого електричного сигналу, що управляє Ψ_{PT} в гідравлічний використовується спеціальний електромагнітний клапан, який працює в

імпульсному режимі і здійснює управління зливом палива з командного порожнини поршня гідроприводу дросельного крана.

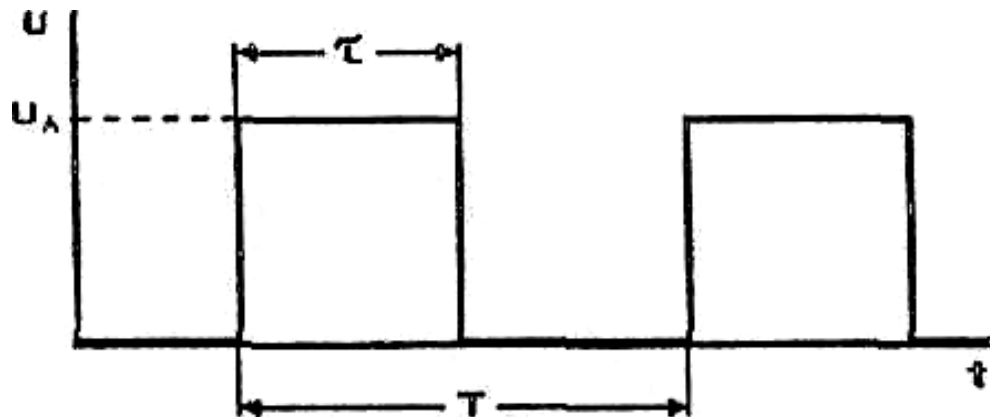


Рис.4.1 Характер зміни імпульсної напруги на виході електронного регулятора

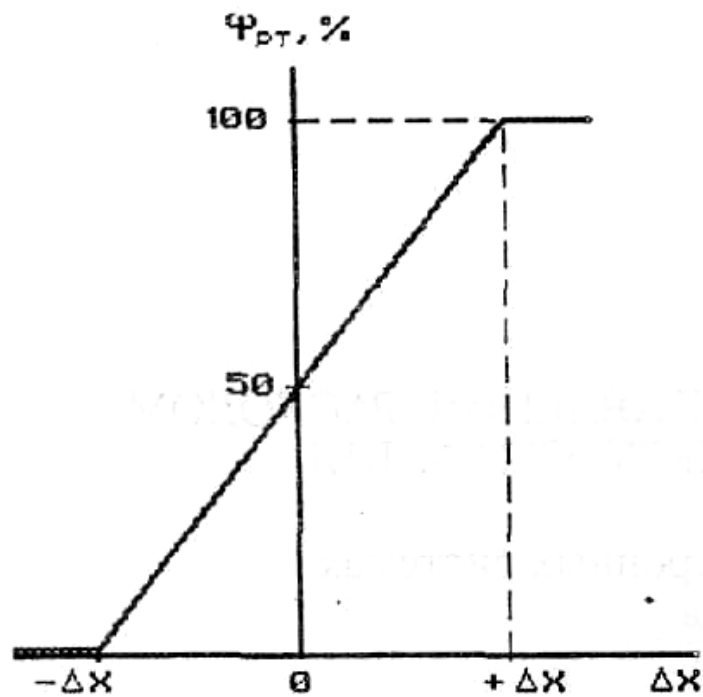


Рис.4.2. Залежність скважності імпульсної напруги від величини неузгодженості ΔX

Даний електромагнітний клапан при цьому називають виконавчим механізмом електронного регулятора. при $\psi_{PT} = \psi_{PT0}$ має місце баланс витрат палива в командному порожнини поршня гідроприводу дросельного крана і він нерухомий.

При $\psi_{PT} > \psi_{PT0}$ виконавчий механізм протягом більшого часу перекриває злив палива з командного порожнини поршня і дросельний кран переміщається на збільшення витрати палива. При $\psi_{PT} < \psi_{PT0}$ рух дросельного крана відбувається в зворотну сторону. При управлінні витратою палива електронним регулятором вплив вимірювального пристрою гідромеханічного регулятора частоти обертання ротора $n_{ВД} = \text{const}$ на гідропривід дросельного крана блокується за допомогою гідроперемикача або селектора.

2. Особливості структури систем управління витратою палива з електронними регуляторами

На рис.4.3 приведена структура системи управління витратою палива ТРД, в якій електронний і гідромеханічний регулятори частоти обертання ротора n включені в систему за допомогою гідроперемикач, положення якого визначається сигналом від блоку контролю електронного регулятора. основною особливістю даної системи є те, що в її електронному регуляторі реалізується вимірювальна частина не обмежувача, а регулятора частоти обертання ротора n настрійка якого визначається положенням руд, як і у гідромеханічного регулятора. При цьому електронний регулятор частоти обертання ротора n як і гідромеханічний, є всережимним. Він здійснює дозування витрати палива в камеру згоряння з режиму малого газу до режимів з максимальною частотою обертання ротора.

У разі виникнення несправності електронного регулятора його блок контролю формує команду на гідроперемикач, перекидка якого примусово викликає відключення електронного регулятора і підключення до гідроперемикач вимірювальної частини гідромеханічного регулятора $n = \text{const}$ і включення в роботу останнього.

Настроювальні характеристики цих регуляторів мають вигляд, показаний на рис.4.4. Звідки видно, що відмова електронного регулятора $n = \text{const}$ і включення в роботу гідромеханічного регулятора на режимах роботи нижче максимального може супроводжуватися незначним збільшенням n , так як настрійка гідромеханічного регулятора на цих режимах роботи вище настрійки електронного. На максимальному режимі роботи турбокомпресора при $\alpha > \alpha_{\text{max}}$, як на найбільш відповідальному

режимі, відмова електронного регулятора супроводжується деяким зниженням n , так як на цих режимах гідромеханічний регулятор налаштований на меншу частоту обертання через його меншу точності.

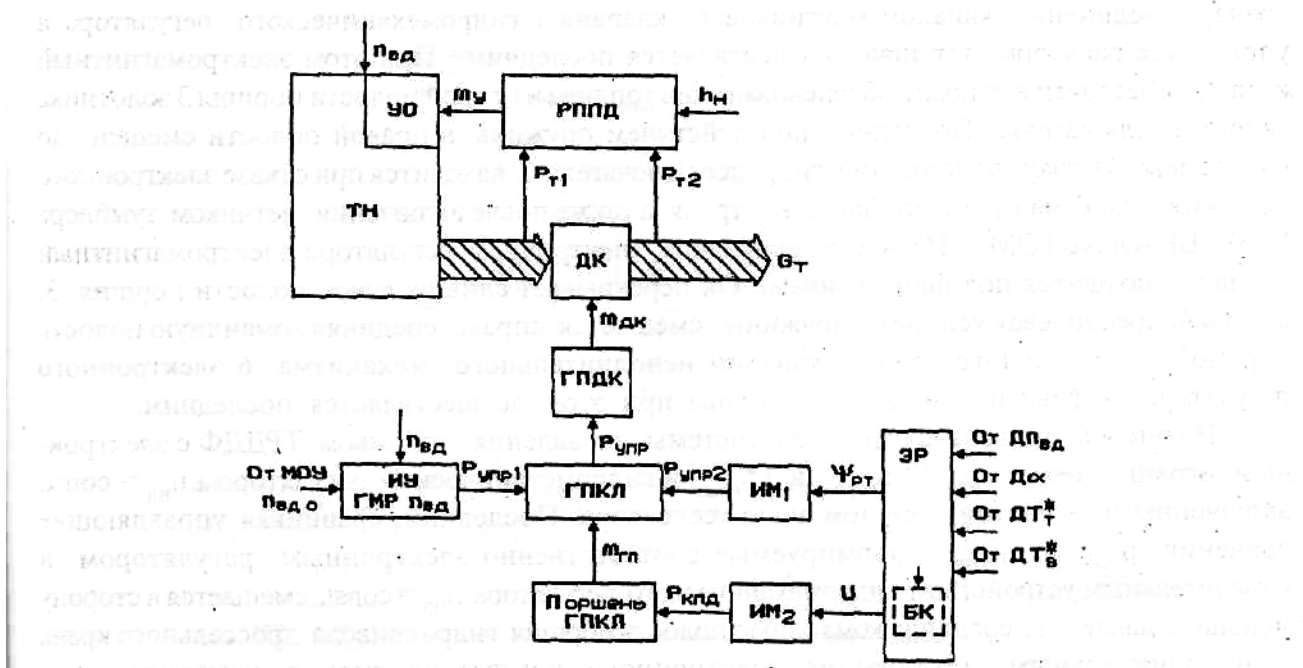


Рис.4.3. Структура системи управління витратою палива

ТРДДФ, що включає електронний і гідромеханічний регулятори, що включаються гідроперемикач показаної на рис.4.3

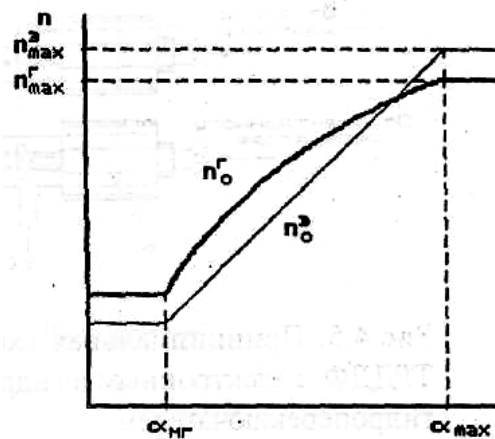


Рис.4.4. Настроювальні характеристики електронного до гідромеханічного регуляторів частоти обертання ротора ГТД системи

3. Бортові аналогові керуючі машини.

Бортові аналогові керуючі машини в каналі управління витратою палива використовуються як для виконання окремих функцій (обмеження температури газів і частот обертання роторів ГТД, запобігання і ліквідації помпажа і ін.), Так і для управління всією силовою установкою, включаючи надзвуковий повітрозабірник, форсажну камеру згоряння і реактивне сопло.

У бортових аналогових керуючих машинах все вхідні, вихідні та проміжні величини подаються у вигляді деяких електричних величин (напруги U , сили струму I або частоти f), кількісні характеристики яких відповідають відбиваним ними сигналами. Всі перетворення, необхідні по ходу реалізації алгоритму управління виконуються, як правило, в окремих пристроях, тобто процес обчислення керуючого сигналу як би розгортається в просторі. Якщо ж процес обчислення розгортався б у часі, тобто одна і та ж ланцюг використовувалася б послідовно для вирішення різних завдань (як в цифрових обчислювальних машинах), то, очевидно, для цього необхідні були б пристрою запам'ятовування проміжних результатів. Запам'ятовування же електричних величин в бортових аналогових керуючих машинах без спотворення дуже важко. Остання обставина є основною причиною неможливості використання однієї і тієї ж аналогової ланцюга в різних контурах регулювання ГТД. Наслідками розгортання обчислювального процесу в просторі, а не в часі, є з одного боку, велика, ніж у бортовий цифрової керуючої машини залежність складності аналогового обчислювача від ступеня складності розв'язуваної задачі і, з іншого боку, високу швидкодію, що дозволяє виконувати необхідні перетворення швидкозмінних величин в реальному масштабі часу.

Операційні підсилювачі є основою аналогового обчислювального пристрою, що виконується на базі тверднісних інтегральних мікросхем або гібридних мікросхем на базі тонкої та товстої плівкової технології. Маса і особливо вартість обчислювальної частини аналогової системи складають значну частину маси і вартості всієї апаратури регулювання. Перепрограмування системи (зміна законів або функцій управління), як правило, пов'язане з повною заміною її обчислювальної частини. Останнє пояснює те, що бортові аналогові керуючі машини не мають властивість універсальності. До кожного типу ГТД при цьому доводиться проектувати індивідуальну бортову аналогову керуючу машину. Зазвичай в електронній частини аналогового регулятора реалізуються вимірювальні частини обмежувачів частот обертання ротора ГТД і температури газу. Обмеження

зазначених параметрів за допомогою електронного регулятора обумовлено більш високою в порівнянні з гідромеханічними точністю їх роботи.

4. Бортові цифрові керуючі машини.

Бортові цифрові керуючі машини є логічним наслідком еволюції систем управління в авіації. Можливість переробки великих обсягів інформації в поєднанні з високою точністю відкриває нові перспективи при створенні систем управління силовими установками літальних апаратів. Досяжна ступінь складності гідромеханічних і аналогових пристроїв в системах управління має фізичні обмеження. При цьому із зростанням обсягу обчислювальних задач істотно зменшується їх надійність. Незважаючи на успіхи мікроелектроніки зважаючи на надзвичайно великої кількості елементів, необхідних для створення бортових цифрових керуючих машин, підсумкова надійність ненадлишкової машини також порівняно невелика і складає 5000 ... 10000 ч / ВТК. Підвищення надійності бортових цифрових керуючих машин при цьому досягається за рахунок резервування ланцюгів. Даний спосіб забезпечення необхідного рівня надійності для гідромеханічних ланцюгів вельми скрутний, тому що призводить до істотного погіршення масових і габаритних характеристик регулюючої апаратури.

Важливою властивістю бортових цифрових керуючих машин є можливість забезпечення безперервного самоконтролю системи управління, виявлення та ідентифікації її несправностей. Пристрій самоконтролю автоматично фіксує відмову і включає на місце несправностей підсистеми - резервну. Складність резервної системи, ступінь забезпечення нею функцій управління залежить від ряду обставин, в тому числі від допустимого рівня зниження якості управління.

В процесі розробки і доведення систем управління особливо важливо мати можливість в найкоротші терміни з мінімальними витратами вносити в них зміни принципового характеру. Цим умовам відповідає система з бортовими цифровими керуючими машинами, зміни в яку вносяться за допомогою зміни програм без конструктивних переробок.

Відмінністю функціонування бортових цифрових керуючих машин від бортових аналогових керуючих машин є те [^] що бортові цифрові керуючі машини виконують додатково наступні операції:.

- послідовний відлік в дискретні моменти часу вхідних аналогових сигналів, що надходять від датчиків (квантування сигналу за часом);
- перетворення отриманих сигналів в цифровий код (квантування сигналів поуровню) і введення їх в обчислювач (процесор);

- обчислення поточних значень неузгодженостей;
- обчислення в відповідно з заданим алгоритмом дії, що управляє по обчисленому значенню неузгодженості;
- зворотне перетворення керуючих впливів в аналоговий сигнал.

Оскільки бортові цифрові керуючі машини є пристроями дискретного типу, вся вихідна інформація з датчиків, проміжна інформація, а також дії, що управляють представляються в них в цифровому коді. процес виконання програм, що реалізують алгоритми управління, являє собою послідовність арифметичних і логічних операцій. На виконання кожної операції потрібен час 1 ... 10 мікросекунд. Тому, на відміну від бортових аналогових керуючих машин, в бортових цифрових керуючих машинах керуючі впливу обчислюються не миттєво, а через кінцевий інтервал часу $t_{\text{вп}}$.

Робота ГТД характеризується безперервною зміною параметрів, які сприймаються, як правило, аналоговими або частотними датчиками. Для зв'язку останніх з бортової цифрової керуючої машини в неї включають аналого-цифрові перетворювачі. Для зв'язку бортовий машини з виконавчими пристроями (виконавчими механізмами) передбачаються цифро-аналогові перетворювачі. Перетворення аналогових величин в цифровий код в аналого-цифровому перетворювачі і з цифрового коду в аналоговий вигляд в цифро-аналоговому перетворювачі здійснюється за певні проміжки часу $\tau_{\text{АЦП}}$ і $\tau_{\text{ЦАП}}$ відповідно. Їх величини знаходяться в межах від декількох мікросекунд до десятків мілісекунд. наприклад, значення в цифро-аналоговому перетворювачі в аналоговий сигнал. Цей сигнал буде сформований тільки в момент часу $t_1 + \tau_1$, тобто з запізненням на величину τ_1 , де час $\tau_1 = \tau_{\text{АЦП}} + t_{\text{вп}} + \tau_{\text{ЦАП}}$.

5. Ефективність застосування електронного регулятора для вертолітного ГТД.

Регулятор двигуна цифровий РДЦ-450М, розроблений в АТ «Елемент» за технічним завданням ДП «Івченко-Прогрес», призначений для реалізації основного закону управління турбовальних двигуном АІ-450М (МІ) - підтримка заданої частоти обертання вільної турбіни за допомогою забезпечення потрібного витрати палива, а також для виконання в автоматичному режимі ряду інших функцій управління, контролю і захисту двигуна, в тому числі для захисту вільної турбіни від «розкрутки» і для синхронізації потужностей двох двигунів при їх совісної роботі в складі силової установки літального апарату

У програмному забезпеченні РДЦ-450М реалізований адаптивний алгоритм управління виконавчим механізмом насоса-дозатора НД-450 (М), який був розроблений ще для РДЦ-450. оскільки спочатку передбачений в технічному завданні алгоритм не забезпечив необхідних характеристик. У поєднанні із застосуванням високопродуктивного мікроконтролера в моделі ЦПУ РДЦ-450М адаптивний алгоритм дозволяє ефективно управляти витратою палива в умовах «сухого тертя».

Крім основних функцій управління і захисту двигуна, виконуваних регулятором, програмне забезпечення реалізує ряд допоміжних функцій. У структурі програмного забезпечення передбачені регулятор параметрів роботи двигуна і регулятор відмов, що забезпечують запис в незалежній пам'яті характеристик режиму роботи і стану САУ і двигуна. Ємність регулятора параметрів становить 10 подій, реєстратора відмов - 20 подій. Також забезпечується запис і зберігання в незалежній пам'яті:

- кількість запусків;
- напрацювання двигуна по режимам;
- сумарного напрацювання двигуна;
- усереднених значень параметрів роботи;

Застосування РДЦ-450М значно зменшує витратою палива, а також з високими міжремонтним і призначеним ресурсами дозволить не тільки знизити прямі експлуатаційні витрати вертольота і підняти інтенсивність його експлуатації, а й збільшити парк модернізованих вертольотів Мі-2 на внутрішньому і зовнішньому ринках.