

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Нурмухаметов Тимур Марсович

УДК 621.438:621.45.02

**ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ТА УСТАНОВОК
В ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВАХ
НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Спеціальність 05.05.16 –турбомашини та турбоустановки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків–2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник –

Доктор технічних наук, професор
Герасименко Володимир Петрович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського “ХАІ”,
професор кафедри теорії авіаційних двигунів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Спіфанов Сергій Валерійович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського “ХАІ”,
завідувач кафедри конструкції авіаційних двигунів

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Голощачов Володимир Миколайович,
Інституту проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України,
старший науковий співробітник відділу
моделювання та ідентифікації теплових процесів

Захист відбудеться 15 травня 2008 року о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий “11” квітня 2008 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Юдін Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Газотурбінні двигуни (ГТД) та установки (ГТДтаУ) знайшли широке застосування в авіації, енергетиці, наземному та морському транспорті, а також в газовій галузі як приводи газоперекачувальних агрегатів (ГПА). В експлуатаційних умовах важливою задачею є визначення дійсних характеристик ГТДтаУ, які змінюються за різними причинами, для оцінювання їхнього технічного стану, оптимальності режимів роботи та рівня завантаження. Але через складність відсутні вимірювання таких основних параметрів ГТДтаУ в експлуатаційних умовах ГПА, як потужність, витрата повітря, температура газу перед турбіною, повні тиски в перерізах проточної частини, що необхідні для отримання зазначених характеристик. Застосування математичного моделювання загалом сприяє вирішенню даної задачі за відсутності прямих вимірювань вихідних параметрів двигуна. Проте, для цього потрібні прийнятні для умов експлуатації моделі. За таких обставин визначення фактичних характеристик ГТДтаУ на основі математичного моделювання з використанням обмежених вимірювань параметрів в експлуатаційних умовах є актуальною проблемою.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Робота є однією зі складових комплексу досліджень, що проводяться на кафедрі теорії авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського "ХАІ" з наукового супроводження та впровадження нових методів і систем удосконалення газотурбінних двигунів та установок для їх створення і експлуатації за держбюджетною темою Г-201-24/2003 (РК0100U002192), а також договором №201-49/2004/592(РК0105U002036).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є визначення фактичних характеристик газотурбінних двигунів та установок на основі математичного моделювання та використання експлуатаційної інформації.

Для досягнення цієї мети в дисертації сформульовані та вирішені наступні задачі:

- розроблені теоретично обґрунтовані математичні моделі турбовальних ГТД, що дозволяють визначати їхні фактичні характеристики та оцінювати технічний стан в експлуатаційних умовах ГПА;
- запропоновані методичні підходи щодо визначення основних параметрів та характеристик ГТД за відсутності повних вимірювань штатними системами контролю;
- виконаний аналіз основних закономірностей, що визначають характеристики вузлів ГТД та форми їх подання, удосконалені методи отримання цих характеристик;
- встановлені зв'язки систем координат та запропоновано їхнє перетворення з метою подання характеристик турбомашин та турбоустановок в прийнятному для застосування в системі ГТД вигляді в експлуатаційних умовах.

Об'єктом дослідження є ГТД та турбоустановки.

Предмет дослідження – математичне моделювання ГТД на основі газодинамічних процесів, експлуатаційних випробувань та узагальнення статистичних даних.

Методи дослідження – розрахунково-теоретичний аналіз термодинамічних та газодинамічних процесів, математичне моделювання ГТД та його вузлів у визначенні їхніх характеристик, теорія планування експерименту та математична статистика.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше одержані наступні наукові результати:

- вперше розроблені адаптивні математичні моделі турбовальних ГТД з регульованою та нерегульованою силовою турбіною, з регенерацією та без регенерації тепла для визначення їхніх експлуатаційних характеристик та оцінювання технічного стану двигуна, що відрізняються внутрішньою організацією моделі;

- дістали подальший розвиток методичні заходи щодо ідентифікації математичних моделей ГТД та його вузлів в системі двигуна за неповної експлуатаційної інформації з використанням перетворень систем координат і планування експерименту;

- удосконалені апроксимаційні характеристики відцентрових компресорів;

- проведено визначення коефіцієнтів технічного стану ГТД за формулами та алгоритмами, що отримані з використанням запропонованих математичних моделей.

Практичне значення одержаних результатів.

- розроблені математичні моделі газотурбінних двигунів дозволяють визначати їхні характеристики в експлуатаційних умовах для оцінювання технічного стану, рівня завантаження та оптимальності режимів роботи ГПА;

- запропоновані методичні рекомендації з ідентифікації математичних моделей ГТД та їх вузлів дозволяють забезпечити адекватність цих моделей та підвищення точності оцінки технічного стану.

- наукові та науково-методичні положення, які отримані в дисертації прийняті для використання в НАК “Нафтогаз України”, ДК “Укртрансгаз”, НВЦ “Техдіагаз” (Акт про впровадження від 18.06.07р.).

Особистий внесок здобувача. Здобувачем особисто виконаний аналіз технічного стану ГТД в газотранспортній галузі та науково-методичної бази з їх експлуатації; виявлені головні проблеми з визначення фактичних характеристик ГПА та оцінки їх технічного стану; поставлені мета і задачі дослідження; зібрані та узагальнені статистичні дані з характеристик авіаційних ГТД і приводів ГПА, їх турбомашин та відцентрових компресорів; з’ясовані основні принципи побудови різних математичних моделей ГТД і його вузлів за апріорною інформацією та сформульовані основні вимоги до моделей, що розроблені; здійснені розрахункові дослідження з використанням запропонованих адаптивних моделей ГТД.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались, обговорювались та одержали позитивну оцінку на 4, 5, 7, 8, 10 та 12 Конгресах моторобудівників України, м. Харків – с. Рибаче, 1999, 2000, 2002, 2003, 2005, 2007 р.р.; науково-практичній конференції “Нафта та газ України-2004”, Судак 2004 р.; Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених “Актуальні проблеми розвитку нафтогазової галузі”, м. Київ, 2005 р.; конференціях молодих вчених ХАІ; розширених семінарах кафедри теорії авіаційних двигунів.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 12 наукових праць, в тому числі 10 статей в фахових виданнях, затверджених ВАК України та 2 тези – в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Робота складається з вступу, п’яти розділів, висновків, додатків і списку використаних джерел. Повний об’єм дисертації 178 сторінок, зокрема: 21 ілюстрація за текстом, 12 ілюстрацій на окремих сторінках, 3 таблиці за текстом, 4 таблиці на окремих сторінках, 9-ти додатків на 22-х сторінках, списку використаних джерел з 128 найменувань на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі досліджень, визначено наукову новизну і практичну значущість отриманих результатів, наведено відомості про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації та публікації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі виконаний аналіз методів визначення фактичної потужності ГТД та огляд існуючих методик оцінювання технічного стану ГПА. Встановлено, що основним критерієм оцінювання є коефіцієнт технічного стану:

$$K_{Ne} = \frac{\sum_{i=1}^s \bar{N}_{e\text{пр}}^i \cdot \bar{N}_{e\text{прб}}^i}{\sum_{i=1}^s \bar{N}_{e\text{прб}}^i}, \quad (1)$$

де $\bar{N}_{e\text{пр}}^i$ – фактичне значення відносної потужності ГТД на i -му контрольному режимі; $\bar{N}_{e\text{прб}}^i = F_6 \cdot \bar{X}_{\text{пр}}^i$ – значення відносної потужності ГТД на його базовій характеристиці; $\bar{X}_{\text{пр}}^i$ – режимний параметр, отриманий на i -му контрольному режимі.

А критерієм ефективності роботи ГПА є коефіцієнт навантаження :

$$K_N = N_{e\text{прб}}^{\text{ек}} / N_{e0}, \quad (2)$$

де N_{e0} – номінальна потужність ГТД.

Використання цих методик передбачає застосування екстраполяцій у визначенні фактичних параметрів ГПА на номінальному режимі роботи, що можуть призвести до великих похибок. Для обґрунтованого використання наведених критеріїв (1), (2) необхідні прийнятні математичні моделі ГТД, які б забезпечували розрахунки з задовільною точністю.

Проведений аналіз вітчизняних та закордонних публікацій з математичного моделювання ГТД та їх вузлів показав наявність великого розмаїття методів, які можуть бути використані як при розробці моделей ГТД верхніх рівнів для отримання характеристик, так і при визначенні спільної роботи вузлів в системі ГТД. Проте моделі мають складну будову і придатні більш для проектування, доведення та створення нових виробів. Їхнє використання в задачах визначення технічного стану ГТД в умовах експлуатації створює складнощі через відсутність на компресорних станціях, в першу чергу, відповідних діагностичних систем, а також обмеження у номенклатурі параметрів, що вимірюються штатною системою контролю ГПА.

Відсутність прийнятних методів отримання характеристик ГТД та його вузлів у експлуатаційних умовах, що забезпечують ідентифікацію та адекватність математичних моделей, дозволила сформулювати мету і задачі роботи та визначити методи дослідження.

У другому розділі наведені узагальнені та дійсні зовнішні експлуатаційні характеристики 25-и газотурбінних приводів ГПА і 36-и відцентрових нагнітачів (ВЦН) (приклади на рис. 1, 2, 3). Виконаний аналіз основних закономірностей будови характеристик дозволив зробити висновки, що вони мають вигляд плавних залежностей, які можна апроксимувати як сім'ю аналітичних функцій залежно від режиму роботи газогенератора та частоти обертання силової турбіни. А застосування перетворення систем координат може значно спростити отримання цих функцій та підвищити точність коефіцієнтів регресії математичних моделей.

З'ясовано, що вибір раціональних систем координат та спрощення за рахунок цього форм подання характеристик може суттєво зменшити потрібну інформацію у моделюванні.

На основі аналізу різних рівнів моделювання ГТД та потреби подання характеристик запропоновано нову структуру моделі двигуна у складі газогенератора (ГГ) та силової

турбіни (СТ). Таку схему ГТД було використано у більшості розроблених математичних моделей у подальшому. Поряд з основними розрахунковими параметрами дослідних ГТД ГПА наведений перелік величин, що вимірюються штатними системами контролю. З цього переліку видно відсутність вимірювання основних параметрів ГТД, що необхідні для побудови характеристик.

Наведені також методики обробки та визначення точності результатів досліджень і перевірки адекватності моделей.

Третій розділ присвячений розробці математичних моделей турбомашин. Велика увага приділяється моделюванню СТ – як вузлу ГТД, характеристики якої у значній мірі визначають зовнішню характеристику двигуна. Вплив режиму роботи газогенератора на характеристику двигуна здійснюється через зміну характеристики СТ у залежності від теплоперепаду на ній, що визначається цим режимом. Для фіксованого режиму роботи газогенератора вважається, що характеристика СТ за частотою обертання відтворює зовнішню характеристику ГТД з вільною турбіною.

Використання рівняння Ейлера для турбомашин дозволило отримати модель силової турбіни за умови фіксованого теплоперепаду на ній, а отже і витрати газу, у вигляді:

$$N_T = 2n - n^2; \quad (3)$$

$$\eta_T = 2n - n^2, \quad (4)$$

де $N_T = N_T/N_p$, $n = n/n_p$, $\eta_T = \eta_T/\eta_{T \max}$ – відносні потужність, частота обертання та ККД турбіни; індекси: т, р – турбіна, розрахунковий, *max* – максимальний розрахунковий.

Зіставлення залежності (3) з дослідними характеристиками 5-ти силових турбін в діапазоні потужностей 6...25 МВт (рис. 4) дало задовільну збіжність результатів з середньоквадратичною похибкою 1,7% в межах діапазону зміни частоти обертання.

Запропонована і теоретично обґрунтована методика перетворення систем координат подання характеристик газових турбін у вигляді прямих ліній та парабол, що значно спрощує їх апроксимації, підвищує точність моделювання та дозволяє їх перебудову у зручні для використання координати залежно від умов застосування.

Зважаючи на те, що математичне моделювання ГТД зводиться до описування лінії робочих режимів на характеристиці компресора чи компресорів двовального ГТ, то запропоновано, згідно теорії подібності для турбомашин та узагальнення статистичних даних, модель осьового компресора у вигляді:

$$C_p T_B^* (\pi_k^{*(k-1)/k} - 1) / \eta_k \approx a \cdot n_{TK}^2; \quad (5)$$

$$\bar{\eta}_k = 1 - 0,06 \pi_{kp}^* - 1 - 0,9 - \bar{n}_{TK}^2, \quad (6)$$

де C_p , T_B^* – теплоємність і температура повітря на вході в компресорі; π_k^* , η_k – ступінь підвищення тиску і ККД компресора; n_{TK} – частота обертання ротора турбокомпресора; a – коефіцієнт пропорційності.

Апроксимації характеристики відцентрового компресора (ВЦК) отримано удосконаленням методу Г.О. Бикова з додатковим залученням узагальнених дослідних даних автора:

$$K_1 = 0,95(1 - \bar{M}_{U_2}), \quad (7)$$

$$K_2 = -0,3 \bar{M}_{U_2}^2 - 0,15 \bar{M}_{U_2} + 0,45. \quad (8)$$

Зіставлення на рис. 5 цих апроксимацій з дослідними даними 3-х ВЦК з більшим значенням π_{kp}^* , виконаних за участю автора, підтверджує задовільну збіжність результатів для $\bar{M}_{U_2} \leq 0,6$. Наявність цих залежностей дозволяє визначити і характеристику ККД $\eta_k = f(\bar{M}_{U_2})$:

$$\eta_k = (\bar{Q} \bar{H}_0 + K_2) / (\bar{Q} \bar{H}_{T0} + K_1). \quad (9)$$

Система рівнянь (7), (8), (9) являє собою математичну модель ВЦК та дозволяє розраховувати його характеристику за заданими $\bar{Q}_0, \bar{H}_0, \eta_{k \max}$ – коефіцієнтами витрати газу, напору та ККД на режимі максимального ККД.

У четвертому розділі розроблені математичні моделі різної складності для визначення зовнішніх характеристик ГТД.

Математична модель ГТД у складі газогенератора та силової турбіни побудована на закономірностях (3), (4) і має вигляд:

$$\eta_e = 2 \frac{n_{TC} - n_{TC}^2}{n_{TC}^2}; \quad (10)$$

$$\eta_e = 2 \frac{n_{TC} - n_{TC}^2}{n_{TC}^2}; \quad (11)$$

де $\eta_e = N_e/N_{e \max}$; $n_{TC} = n_{TC}/n_{Nmax}$; $\eta_e = \eta_e/\eta_{e \max}$ для кожного режиму роботи газогенератора-турбокомпресора $\bar{n}_{\delta e} = const$. Додатково до рівнянь (10), (11) використані залежності $N_{e \max}/N_{e p} = f(\bar{n}_{\delta e})$; $n_{TC Nmax}/n_{TC p} = f(\bar{n}_{\delta e})$; $\eta_{e \max}/\eta_{e p} = f(\bar{n}_{\delta e})$, що моделюють ГГ, а вся система рівнянь в цілому являє собою математичну модель ГТД. З метою спрощення подання характеристик вузлів ГГ, що спрощує і саму математичну модель двигуна в цілому, зважаючи на порівняно вузький діапазон зміни режимів роботи вузлів, обґрунтована можливість обмежитись аналізом характеристик цих вузлів вздовж лінії робочих режимів на характеристиці компресора. У цьому випадку математична модель ГТД спільно з рівняннями (10), (11) отримана на основі теорії подібності у вигляді:

$$\bar{N}_{e \max} = n_{TK}^{-3} \left[1 - \frac{D}{1 + l_{kp} n_{TK} \eta_{kp}} \right] / \left[1 - \frac{D}{1 + l_{kp} n_{TK} \eta_{kp}} \right], \quad (12)$$

де $D = \left(\frac{\pi_{TK}^*}{\sigma_{BK} \sigma_{KC}} \right)^{k_r - 1}$; $l_{kp} = (\pi_{kp}^{*(k-1)/k} - 1) / \eta_{kmax}$; $v = (k/(k-1)) \cdot ((k_r - 1)/k_r)$; π_{kp}^* и η_{kp} – ступінь

підвищення тиску і ККД компресора на розрахунковому режимі роботи за даними умовами експлуатації ГТД.

ККД компресора з невисокими $\pi_{kp}^* \leq 9 \dots 12$ у цій моделі з точністю до 5% описується залежністю (6), а зміна зведеної роботи компресора $l_{kp} = (\pi_{kp}^{*(k-1)/k} - 1) / \eta_{kp}$ залежно від частоти обертання вздовж лінії робочих режимів – параболою (5). Перевірка рівняння (12) на узагальнених характеристиках 15-ти ГПА (рис. 1) з порівняно невисокими розрахунковими значеннями $\pi_{kp}^* \leq 9 \dots 12$ засвідчила про похибку, що досягає 10...12% на режимі $n_{TK} = 0,9$, $n_{TC} = 0,8$. Така похибка пояснюється, перш за все, рівнем точності залежності (6). З урахуванням цього залежність (12) було уточнено. Уточнену модель спочатку перевірено на узагальнених характеристиках 15-и газотурбінних приводів (ГТП) ГПА (рис. 6). Тут пунктирною лінією з точністю до 3% наведені дані моделі у вигляді:

$$N_e = 2n_{TC} n_{TK}^{3,1} - 2n_{TC}^2 n_{TK}^{1,45};$$

$$\eta_e = 2n_{TC} n_{TK}^{0,05} - 2n_{TC}^2 n_{TK}^{1,7}.$$

З більш високою точністю (до 0,5%) (суцільна лінія на рис. 6) характеристика описується рівняннями:

$$N_e = 2n_{TC} n_{TK}^{(3,28-0,2n_{TK})} - 2n_{TC}^2 n_{TK}^{(2,66-1,4n_{TK})}; \quad (13)$$

$$\eta_e = 2n_{TC} n_{TK}^{(3,38-4,0n_{TK})} - 2n_{TC}^2 n_{TK}^{(2,76-5,2n_{TK})}.$$

Аналогічні моделі (10), (11) також отримано для 9 двигунів, для яких зміна режиму ГГ описується рівняннями:

ГТД Д-336 (рис. 7) в діапазоні $n_{BT} = 0,941 \dots 1,0$ та $n_{TC} = 0,75 \dots 1,1$

$$N_e = n_{BT}^{8,72}; \quad n_{TC Nmax}/n_{TC p} = n_{BT}^{2,15}; \quad \eta_{e \max} = n_{BT}^{16,75-15 \text{ нвт}}; \quad (14)$$

вертолітного ГТД (рис. 8, а) в діапазоні $n_{TK}=0,92\dots 1,0$

$$N_e = n_{BT}^{5,75}; \quad n_{TCNmax}/n_{TCp} = n_{BT}^{1,75},$$

газотурбінних приводів ГПА:

– АІ-336-2-8 (рис. 8, б) в діапазоні $n_{BT}=0,95\dots 1,0$

$$N_e = n_{BT}^{7,8}; \quad n_{TCNmax}/n_{TCp} = n_{BT}^{2,5},$$

– АІ-336-1-10 (рис. 8, в) в діапазоні $n_{BT}=0,967\dots 1,0$

$$N_e = n_{BT}^{11,1}; \quad n_{TCNmax}/n_{TCp} = n_{BT}^{2,43},$$

– АІ-336-2-10 (рис. 9,а) в діапазоні $n_{BT}=0,968\dots 1,0$

$$N_e = n_{BT}^{8,85}; \quad n_{TCNmax}/n_{TCp} = n_{BT}^{5,0},$$

– НК-12СТ (рис. 9,б) в діапазоні $n_{TK}=0,963\dots 1,0$

$$N_e = n_{BT}^{2,4}; \quad n_{TCNmax}/n_{TCp} = n_{BT}^{1,03},$$

— ДН-80Л в діапазоні $n_{BT}=0,925\dots 1,0$ (рис.8,г)

$$N_e = n_{BT}^{6,81}; \quad n_{TCNmax}/n_{TCp} = n_{BT}^{2,1}; \quad \eta_{e\ max} = n_{BT}^{1,55}, \quad (15)$$

та транспортного ГТД GT-601

$$N_e = n_{BT}^{3,9}; \quad n_{TCNmax}/n_{TCp} = n_{TK}^{1,0}.$$

Модель турбовального ГТД з регульованим сопловим апаратом (РСА) силової турбіни ГПА типу ГТК-10І, ГТК-25І у відносних координатах $e = N_e/N_{e\ max}$, $\eta_e = \eta_e/\eta_{e\ max}$, $n_{TC} = n_{TC}/n_{TCNmax}$ має вигляд (10), (11), як і для звичайного ГТД, проте положення максимумів на характеристиках з дроселюванням двигуна визначається двома змінними: $N_{e\ max} = f(n_{TK}, \alpha_1)$, $\eta_{e\ max} = f(n_{TK}, \alpha_1)$, $n_{TCNmax} = f(n_{TK}, \alpha_1)$. Вплив РСА додатково описується залежностями $N_{e\ max}/N_{ep} = f(\alpha_1)$, $\eta_{e\ max}/\eta_{ep} = f(\alpha_1)$, $n_{TCNmax}/n_{TCp} = f(\alpha_1)$:

$$n_{TCNmax}/n_{TCp} = 1 - \bar{C}_{ap} (ctg\alpha_{1p} - ctg\alpha_1);$$

$$N_{e\ max}/N_{ep} = 1 - \bar{C}_{ap} (ctg\alpha_{1p} - ctg\alpha_1);$$

У випадку подання зовнішньої характеристики ГТД з РСА силової турбіни залежностями від частоти обертання та температури за силовою турбіною $N_e = f(n_{TC}, T_T^*)$ при $n_{TK} = const$ (рис. 10) в приводах ГПА ГТК-10І та ГТК-25І з перехресною програмою регулювання виникла необхідність заміни змінної α_1 на температуру T_T^* тому, що останній параметр є контрольованим разом з n_{TC} та n_{TK} . Це привело до зміни вигляду рівнянь (10), (11). Так зовнішня характеристика ГТК-10І ($N_{e\ ном} = 10880$ кВт; $n_{TC\ ном} = 6500$ об/хв; $T_{T\ ном}^* = 806$ К) за стандартних атмосферних умов подана у вигляді сім'ї парабол (рис. 10):

$$\bar{N}_e = \bar{N}_{max} - 1,15 \bar{n}_{TCNmax} - \bar{n}_{TC}^2; \quad (16)$$

$$\bar{N}_{max} = \bar{T}_T^{*(8,045-6,045\bar{T}_T^*)}; \quad (17)$$

$$\bar{n}_{TCNmax} = 1,08 \bar{T}_T^{*0,8}, \quad (18)$$

де $\bar{N}_e = N_e/N_{e\ ном}$; $\bar{n}_{TC} = n_{TC}/n_{TC\ ном}$; $\bar{N}_{max} = N_{max}/N_{e\ ном}$; $\bar{n}_{TCNmax} = n_{TCNmax}/n_{TC\ ном}$; $\bar{T}_T^* = T_T^*/T_{T\ ном}^*$; індекси: *max* – максимальний; *ном* – номінальний режим.

Застосування теорії планування експерименту (центрального композиційного плану – ЦКП) у визначенні характеристик ГТД дозволило отримати адаптивну математичну модель двигуна АІ-336 (19), (20) та приводу ГТК-10І (21) (рис. 11):

$$\bar{N}_e = -55393,1 - 1,2341 n_{TC} + 7,87752 n_{BT} + 12,86 \cdot 10^{-5} n_{TC} n_{BT} - 5,84 \cdot 10^{-5} n_{TC}^2 - 28,13 \cdot 10^{-5} n_{BT}^2; \quad (19)$$

$$\bar{\eta}_e = -35,708 - 57,159 \cdot 10^{-5} n_{TC} + 530,533 \cdot 10^{-5} n_{BT} + \quad (20)$$

$$+ 75,275 \cdot 10^{-9} n_{TC} n_{BT} - 49,0435 \cdot 10^{-9} n_{TC}^2 - 197,594 \cdot 10^{-9} n_{BT}^2$$

$$N_e = -45677,641 - 0,4525 n_{TC} + 113,272 T_T^* + 0,00544 n_{TC} T_T^* - 2,7 \cdot 10^{-4} n_{TC}^2 - 0,0753 T_T^{*2}. \quad (21)$$

Такий підхід суттєво спрощує визначення дійсних характеристик в експлуатаційних умовах ГПА. Проте ідентифікація моделі ГТД з використанням ортогонального ЦКП потребує 9-и випробувань: при 3-х частотах обертання силової турбіни та 3-х режимах роботи ГГ, однак при використанні моделей ГТД у вигляді(10), (11) її ідентифікація потребує лише часткових уточнень.

З метою ідентифікації розглянутих моделей та обґрунтування кількості незалежних змінних для подання зовнішніх характеристик ГТД та отримання залежностей, що описують характеристику ГГ (положення максимумів у рівняннях (10), (11)) наведено повузлову математичну модель ГТД першого рівня, яка побудована на базі законів зберігання маси та енергії, характеристик вузлів, а також балансів потужностей турбокомпресора. Для ГТД з одновальним газогенератором отримано 15 рівнянь з 20 невідомими $G_B, G_T, n_K, n_{TK}, n_{TC}, q_T, T_H^*, T_K^*, T_G^*, T_{TK}^*, T_T^*, P_H^*, P_B, P_K^*, P_{TK}^*, P_T^*, \eta_K^*, \eta_{TK}^*, \eta_{TC}^*, q(\lambda_{вих})$. Тут величини P_H^*, P_B и T_H^* для стаціонарної ГТУ визначаються атмосферними умовами і вважаються відомими. Для однозначного розв'язання системи рівнянь, необхідно задавати ще дві додаткові умови, які визначаються програмою регулювання. В якості двох незалежних змінних використовують n_{TK} та n_{TC} . Отже, характеристики одновального ГТД можуть бути отримані у вигляді $N_e=f(n_{TK}, n_{TC})$; $\eta_e=f(n_{TK}, n_{TC})$.

Для ГТД з двовальним газогенератором додається ще 8 рівнянь та стільки ж змінних $P_{KHT}^*, T_{KHT}^*, P_{TBT}^*, T_{TBT}^*, \eta_{KBT}, \eta_{THT}, n_{KBT}, n_{TBT}$. У даному випадку характеристики ГТД для заданих атмосферних умов також записуються у залежності від двох змінних n_{BT} та n_{TC} з урахуванням ковзання роторів турбокомпресора $S=n_{BT}/n_{HT}$.

У якості адаптивної моделі однокаскадного компресора, яка б дозволяла ідентифікувати його характеристики в експлуатаційних умовах у системі двигуна за результатами випробувань на основі центрального композиційного плану, запропоновано також апроксимаційні залежності:

$$\pi_k^* = a_0 + a_1 \bar{n}_{np} + a_2 \frac{\pi_k^*/G_{np}}{(\pi_k^*/G_{np})_p} + a_{12} \bar{n}_{np} \frac{\pi_k^*/G_{np}}{(\pi_k^*/G_{np})_p} + a_{11} \bar{n}_{np}^2 + a_{22} \left[\frac{\pi_k^*/G_{np}}{(\pi_k^*/G_{np})_p} \right]^2 ;$$

$$\frac{\pi_k^{*k-1}}{\eta_k^*} = b_0 + b_1 \bar{n}_{np} + b_2 \frac{\pi_k^*/G_{np}}{(\pi_k^*/G_{np})_p} + b_{12} \bar{n}_{np} \frac{\pi_k^*/G_{np}}{(\pi_k^*/G_{np})_p} + b_{11} \bar{n}_{np}^2 + b_{22} \left[\frac{\pi_k^*/G_{np}}{(\pi_k^*/G_{np})_p} \right]^2 .$$

Поліномами подібного вигляду може бути описана і характеристика турбіни компресора, але в інших координатах:

$$\frac{G_T \sqrt{T_T^*}}{P_T^*} = f\left(\pi_{TK}^*, \frac{n_{TK}}{\sqrt{T_T^*}}\right); \quad \eta_{TK}^* = f\left(\pi_{TK}^*, \frac{n_{TK}}{\sqrt{T_T^*}}\right).$$

Для спрощення отримання цих поліномів в експлуатаційних умовах за результатами випробування доцільно ці характеристики подавати у вигляді:

$$\frac{G_T \sqrt{T_T^*}}{P_T^*} = f(\bar{n}_{np}, (\pi_k^*/G_{np})/(\pi_k^*/G_{np})_p);$$

$$\eta_{TK}^* = f(\bar{n}_{np}, (\pi_k^*/G_{np})/(\pi_k^*/G_{np})_p);$$

$$\pi_{TK}^* = f(\bar{n}_{np}, (\pi_k^*/G_{np})/(\pi_k^*/G_{np})_p); \quad \frac{n_{TK}}{\sqrt{T_T^*}} = f(\bar{n}_{np}, (\pi_k^*/G_{np})/(\pi_k^*/G_{np})_p)$$

У п'ятому розділі наведено алгоритм визначення фактичної потужності ГТД з використанням розроблених моделей (10) та отримано формулу для визначення технічного стану:

$$K_{N_e} = 2a_\phi/a_6 - b_\phi/b_6,$$

де a_ϕ , b_ϕ і a_6 , b_6 – коефіцієнти регресії для фактичної і базової характеристик двигуна (як парабол), відповідно. Визначення коефіцієнта технічного стану за цією формулою для 3-х приводів ГПА різного типу і дало задовільні результати. В табл. 1 наведено приклад розрахунку коефіцієнтів технічного стану K_{N_e} для ГТД Д-336.

Таблиця 1

Визначення коефіцієнту технічного стану ГТД

№№	Процеси, що приводять до зміни характеристик ГТД	Коефіцієнт K_{N_e}
1	Зміщення напірної характеристики КВТ по ступені підвищення тиску на 1%	1,0
2	Зниження ККД силової турбіни на 1%	0,990
3	Зниження ККД КВТ на 1%	0,965

Зважаючи на те, що кількість контрольованих параметрів ГПА в експлуатаційних умовах дуже обмежена (відсутні прямі вимірювання потужності, витрати повітря, температури газу перед турбіною та ін.), що не дозволяє у повній мірі здійснювати параметричне діагностування до вузла ГТД, запропоновано методику отримання термогазодинамічних параметрів за неповних вимірювань, побудовану з використанням законів збереження, рівнянь стану та процесів, або математичних моделей. Так, для визначення витрати повітря через двигун запропонована формула:

$$G = 0,0637 K_G F_B \frac{P_B^*}{\sqrt{T_B^*}} \left(\frac{P_B}{P_B^*} \right)^{\frac{2}{3}} \sqrt{5 \left[1 - \left(\frac{P_B}{P_B^*} \right)^{\frac{1}{3}} \right]}.$$

Повний тиск в любому перерізі проточної частини двигуна можна розрахувати за виміром статичного тиску з використанням витрати повітря (газу), повної температури та напрямку течії за допомогою газодинамічних функцій:

$$p_i^* = p_i / p(\lambda_i) = p_i / (1 - (k-1)/(k+1)\lambda_i^2)^{k/(k-1)};$$

$$\frac{G \sqrt{T_i^*}}{m F_i p_i \sin \alpha_i} = y(\lambda_i); \quad (22)$$

$$y(\lambda_i) = ((k+1)/2)^{1/(k-1)} \lambda_i / (1 - (k-1)/(k+1)\lambda_i^2).$$

Напрямок течії α_i тут визначається лопатковими вінцями.

Якщо вимірювання повної температури відсутнє, то для визначення повного тиску в системі рівнянь (22) необхідно скористатися формулами:

$$\frac{G \sqrt{T_i}}{m F_i p_i \sin \alpha_i} = x(\lambda_i); \quad x(\lambda_i) = ((k+1)/2)^{1/(k-1)} \lambda_i / (1 - (k-1)/(k+1)\lambda_i^2)^{1/2}.$$

Також отримано методом енергетичних балансів рівняння для визначення витрати повітря через двигун з використанням витрати палива G_T . Так для двигунів, в штатну систему контролю яких входить вимір температури газу T_{TK}^* перед силовою турбіною, витрата повітря-газу визначається формулою:

$$G_B = G_T (H_u \eta_\Gamma \eta_M \eta_{отб} \eta_{охл} / (C_p \Gamma_{TK}^* - C_p T_H) - 1).$$

Для поліпшення характеристик ГТД деяких ГПА, що експлуатуються в газотранспортній галузі, як відомо, використана регенерація теплоти. Залежність розрахункового ККД таких ГТД від міри регенерації β_p має вигляд:

$$\eta_{ep} = \frac{\left(\frac{C\theta\eta_k\eta_k - 1}{e} \right) \epsilon - 1 \frac{-1}{\eta_k}}{\theta \left\{ E - \beta_p \left[E - C \left(1 - \frac{1}{e} \right) \eta_T \right] \right\} - 1 - \beta_p \left[1 + \epsilon - 1 \frac{-1}{\eta_k} \right]}. \quad (23)$$

Тоді як за відсутності регенерації –

$$\eta_e = ((C\theta\eta_k\eta_T/e-1) \cdot (e-1)/\eta_k) / (E\theta-1-(e-1)/\eta_k), \quad (24)$$

де $e = \pi_k^{(k-1)/k}$; $\theta = T_T/T_H$ – ступінь підігріву в циклі; $C = (Cp_T(e_T-1)e)/(Cp(e-1)e_T) \approx 1,05$; $E = \frac{Cp_T}{Cp}$;

$e_T = \pi_T^{k-1/k}$; η_k, η_T – ККД компресора та турбіни відповідно.

Дослідження рівнянь (23) і (24) на екстремум за змінною π_k дозволило визначити умови досягнення максимуму ефективного ККД відповідно за наявності та відсутності регенерації у вигляді формул оптимальних значень $\pi_{k\eta_e}$. Застосування регенерації тепла не змінює характеристику ГТД (рис. 6) за потужністю, але приводить до підвищення рівнів ККД $\eta_{e \text{ расч}}$ в Δ разів, де:

$$\Delta = (E\theta - 1 - (e-1)/\eta_k) / (\theta(E - \beta_p(E - C(1-1/e)\eta_T)) - (1 - \beta_p)(1 + (e-1)/\eta_k)).$$

Ці особливості були враховані і підтверджені при використанні рівнянь (10), (11) для побудови характеристик ГТД з регенерацією теплоти ГПА ГТК-10-4Б (рис. 2).

Результати перевірки адекватності за критерієм Фішера більшості розроблених моделей ГТД наведені в табл. 2, де $S^2_{ад}$, S^2_y – дисперсії адекватності та експерименту відповідно; f_1, f_2 – число ступенів свободи адекватності та дисперсії експерименту; F_d, F_T – дослідний і табличний критерії Фішера.

З таблиці видно, що моделі адекватні ($F_d < F_T$) з вірогідністю $P=0,99$.

Крім того, виконано перевірку моделей як на однотипних зразках двигунів, так і на інших з близькими за розрахунковими основними параметрами ($\pi_{k p}^*, T_{T p}^*$). Похибки у цьому випадку склали від 0,1 до 1,5% в широкому діапазоні режимів роботи, що свідчить про задовільний збіг розрахункових і дійсних характеристик двигунів (табл.3).

Таблиця 2

Перевірка адекватності математичних моделей ГТД

№№	Тип ГТД	Рисунок	Параметр	Значення величин					
				$S^2_{ад}$	S^2_y	f_1	f_2	F_d	F_T
1	Д-336	7	$\overline{N_e}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	10	36	2,2	2,86
			$\overline{\eta_e}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	10	22	2,27	3,26
2	Вертолітний	8,а	$\overline{N_e}$	$0,33 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	18	36	0,33	2,49
3	АІ-336-2-8	8,б	$\overline{N_e}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	25	36	0,5	2,33
4	АІ-336-1-10	8,в	$\overline{N_e}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	6	36	1,2	3,35
5	АІ-336-2-10	9,а	$\overline{N_e}$	$0,55 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	6	36	0,55	3,35
6	НК-12СТ	9,б	—	$0,14 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	7	36	0,14	3,18

№№	Тип ГТД	Рисунок	Параметр	Значення величин					
				$S_{ад}^2$	S_v^2	f_1	f_2	F_d	F_T
			N_e						
7	ДН-80Л	8,г	$\overline{N_e}$	$0,2 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	14	36	0,2	2,62
			η_e	$0,07 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	14	22	0,063	3,02
8	ГТК-10І	9	$\overline{N_e}$	$0,7 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	22	36	0,7	2,39
9	АІ-336-10	10,а	$\overline{N_e}$	$0,63 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	38	36	0,63	2,19
			η_e	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	38	22	0,45	2,56
10	ГТК-10І	10,б	$\overline{N_e}$	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	9	36	2,0	2,95

Таблиця 3

Перевірка достовірності математичних моделей ГТД

Наймен. виробу	Режимні параметри			N_e , МВТ	Похибка випробув., %	K_{N_e} , ГТД	$\frac{N_e}{K_{N_e}}$ МВТ	Розрахунок по ММ		Похибка розрахунків по ММ, %
	$\overline{n_{тс}}$	$\overline{n_{вт(тк)}}$	$\overline{T_T^*}$					Номер формули	N_e^M МВТ	
ГТК-10І	0,85	-	0,868	6,595	4	0,98	6,73	(16)-(18)	6,63	1,4
	0,87	-	0,887	7,204			7,35		7,25	1,4
	0,9	-	0,918	7,943			8,1		7,99	1,3
Д-336	0,82	0,976	-	4,29	3	0,97	4,42	(14)	4,48	1,4
	0,753	0,978	-	4,27			4,402		4,47	1,5
	0,765	0,976	-	4,35			4,48		4,43	1,1
	0,8	0,975	-	4,28			4,41		4,46	1,2
ДН-80Л	0,973	0,982	-	21,797	3	0,98	22,24	(15)	22,516	1,2
	1,0	0,989	-	22,89			23,357		23,63	1,2
	0,952	0,971	-	20,01			20,418		20,655	1,2
ГТК-10-4Б	0,898	0,984	-	8,236	3	0,89	9,253	(13)	9,188	0,7
	0,868	0,97	-	7,648			8,59		8,561	0,3
	0,845	0,956	-	7,098			7,975		7,981	0,1
ДН-70Л	0,944	0,973	-	7,643	8	0,98	7,79	(14)	7,88	1,15
	0,926	0,966	-	7,234			7,38		7,39	0,1
	0,912	0,962	-	7,027			7,17		7,13	0,6
	0,905	0,95	-	6,358			6,48		6,17	1,4

ВИСНОВКИ

Основною проблемою в оцінюванні технічного стану ГТД, рівня його завантаження та оптимальності режимів роботи є отримання фактичних експлуатаційних характеристик. Існуючі нормативні рекомендації з використання для цих цілей "базових" дресельних характеристик призводять до великих похибок. Створення методик визначення характеристик ГТД на основі математичного моделювання та експлуатаційної інформації –

актуальне науково-технічне завдання, вирішення якого відповідає істотному підвищенню ефективності експлуатації двигуна за технічним станом.

В дисертації подані нові розв'язання цього завдання, а саме:

1. Розроблено теоретично обґрунтовану математичну модель ГТД, що відрізняється структурою. Модель відображує експлуатаційну характеристику двигуна як сім'ю парабол, де форма характеристики визначається силовою турбіною, а відносний зсув максимумів на параболах – зміною режимів роботи газогенератора по лінії робочих режимів його турбокомпресора.

2. Для ідентифікації математичних моделей запропоноване адаптивне моделювання двигуна та його вузлів з застосуванням методів ортогонального планування експерименту, що дозволяє суттєво скоротити експлуатаційні випробування ГПА у визначені дійсних характеристик ГТД.

3. Обґрунтовано і отримано математичну модель ГТД з регульованим сопловим апаратом силової турбіни. Використання перехресної програми регулювання в ГТД з регульованою силовою турбіною ГПА типу (ГТК-10І, ГТК-25І) зменшує число змінних з 3-х до 2-х.

4. Доведено, що для отримання характеристики ГТД з регенерацією теплоти за потужністю можуть бути використані запропоновані математичні моделі звичайних ГТД, а для характеристики двигуна за ККД теоретично отримано коректувальний коефіцієнт.

5. Аналіз галузевих нормативних методик з оцінювання технічного стану газотурбінних приводів ГПА за їх характеристиками дозволив виявити основні причини великих похибок через некоректне використання для цих цілей "базових" дросельних характеристик ГТД та процедури їх екстраполяції. Запропоновано алгоритм визначення основних параметрів (N_e , $M_{кр}$) та коефіцієнта технічного стану ГТД за розробленими математичними моделями, що дозволив усунути зазначені недоліки в нормативних методиках.

6. Розроблені математичні моделі були верифіковані на двигунах типу Д-336, ДН-80Л, НК-12СТ, GT-60І, ГТК-10І. Перевірка їх адекватності і достовірності підтвердила задовільну точність з вірогідністю $P = 0,99$.

7. Дослідження існуючих методів математичного моделювання турбін і компресорів у вигляді апроксимацій характеристик показало їхню велику складність, що робить на даний час не прийнятним застосування повузлового моделювання ГТД в експлуатаційних умовах ГПА. Встановлено, що шляхом перетворення систем координат можна значно спростити таке моделювання. Запропонований спеціальний вибір систем координат і їх перетворення для подання характеристик турбомашин в системі ГТД підтверджує таку можливість.

8. Теоретично отримано залежності для розрахунку основних параметрів двигуна (витрати циклового повітря, повних тисків в перерізах проточної частини та ін.) за неповною експлуатаційною інформацією штатної системи контролю.

9. Результати досліджень впроваджені в науково-технічному центрі з діагностики «Техдіагаз» газотранспортної галузі України.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. К определению термогазодинамических параметров в проточной части турбоустановок для их диагностирования при доводке и эксплуатации/ В.П. Герасименко, Л.П. Губский, Н.К. Рязанцев, Б.С. Сотников, Т.М. Нурмухаметов // Авіаційно-космічна

техніка і технологія: Збірник наукових праць. – Харків: ХАІ. - 1999. – Вип. 9. – С. 264–266. Здобувач виконав постановку задачі та провів аналіз штатних схем вимірювання термодинамічних параметрів ГПА.

2. Деякі заходи щодо удосконалення газотурбінних приводів газоперекачувальних агрегатів/ В.П. Герасименко, С.О. Саприкін, О.Л. Портянко, А.С. Мандра, Т.М. Нурмухаметов// Авіаційно-космічна техніка і технологія: Збірник наукових праць. – Харків: ХАІ. - 2000. – Вип. 19. – С. 55–58. Здобувач проводив порівняльний аналіз існуючих схем газотурбінних установок в системі ГПА та виконував оцінки оптимальних параметрів за допомогою отриманих в роботі рівнянь.

3. О преобразовании систем координат параметров для аппроксимации характеристик газовых турбин/ В.П. Герасименко, Н.К. Рязанцев, Ю.А. Анимов, Т.М. Нурмухаметов// Авіаційно-космічна техніка і технологія: Збірник наукових праць. – Харків: ХАІ. - 2002. – Вип. 30. – С. 61–64. Здобувач виконував перетворення систем координат подання характеристик газових турбін.

4. Герасименко В.П., Нурмухаметов Т.М. Математическая модель газотурбинного привода газоперекачивающего агрегата с регулируемой силовой турбиной// Питання розвитку газової промисловості України: Зб. наук. праць. – Х.: Укрндігаз, 2002. – Вип. XXX. – С. 196–201. Здобувач отримав залежності впливу регулювання соплового апарату на характеристики газових турбін.

5. Математичне моделювання газотурбінного приводу газоперекачувального агрегату/ В.П. Герасименко, А.С. Мандра, М.В. Кучерук, Т.М. Нурмухаметов// Нафтова і газова промисловість. – 2002р. – № 4. – С. 37–38. Здобувач збирав та оброблював статистичні дані ГПА, проводив аналіз та перевірку отриманих результатів.

6. Расчет характеристик ступеней компрессора на режимах вращающегося срыва/ В.П. Герасименко, Т.М. Нурмухаметов, Е.В. Осипов, М.Ю. Шелковский // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Збірник наукових праць. – Харків: ХАІ. - 2002. – Вип. 34. – С. 26–28. Здобувач виконував зіставлення запропонованих апроксимаційних залежностей з експериментальними результатами.

7. Герасименко В.П., Анимов Ю.А., Нурмухаметов Т.М. Аппроксимация характеристик центробежных компрессоров// Авіаційно-космічна техніка і технологія: Науково-технічний журнал. – Харків: ХАІ. - 2003. – №37/2'2003. – С. 65–69. Здобувач розширив статистичні дані з характеристик відцентрових компресорів природного газу та виконував досліди з уточнення апроксимаційних залежностей.

8. Математичне моделювання газотурбінного приводу газоперекачувального агрегату за його фактичним станом/ В.П. Герасименко, А.С. Мандра, М.В. Кучерук, Т.М. Нурмухаметов// Нафтова і газова промисловість. – 2004р. – № 5. – С. 34–37. Здобувач виконував перевірку адекватності моделі.

9. Адаптивное математическое моделирование газотурбинного привода газоперекачивающего агрегата/ В.П. Герасименко, А.С. Мандра, Н.Б. Налесный, Т.М. Нурмухаметов// Авіаційно-космічна техніка і технологія: Науково-технічний журнал. – Харків: ХАІ. - 2005. – № 2(18) . – С.49–53. Здобувач проводив дослідні розрахунки з ідентифікації адаптивних моделей та виконував моделювання двигуна типу АИ-336.

10. Нурмухаметов Т.М. Математическое моделирование газотурбинного двигателя с регулируемой силовой турбиной// Авіаційно-космічна техніка і технологія: Науково-технічний журнал. – Харків: ХАІ. – 2007. – №10(46). – С. 142-144.

11. Математическое моделирование газотурбинного привода ГПА/Т.М. Нурмухаметов, А.С. Мандра, Н.В. Кучерук, В.П. Герасименко// Матеріали 8 міжнародної науково-практичної Конференції “Нафта і газ України – 2004”. – Судак. – 2004. – Т. 2. – С. 167–168.

12. Адаптивное моделирование привода газоперекачивающего агрегата/Т.М. Нурмухаметов, Н.Б. Налесный, В.П. Герасименко// Проблемы нефтегазовой промышленности: Сборник научных работ. – Київ. - 2005. – Вип.2 – С.220-221.

АНОТАЦІЯ

Нурмухаметов Т.М. Визначення характеристик газотурбінних двигунів та установок в експлуатаційних умовах на основі математичного моделювання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки. – Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського “ХАІ”, Харків, 2008р.

Дисертаційна робота присвячена визначенню фактичних характеристик ГТДтаУ та його вузлів в експлуатаційних умовах на основі математичного моделювання. Розроблено різно-рівневі математичні моделі турбовальних ГТД з регульованим та нерегульованим сопловими апаратами силової турбіни, з регенерацією та без регенерації теплоти. Проведено зіставлення отриманих математичних моделей ГТД з дослідними характеристиками та підтверджено їх адекватність. Запропоновано методики розрахунку необхідних газодинамічних параметрів ГПА за неповними вимірюваннями існуючими штатними системами контролю ГПА. Удосконалено апроксимаційні характеристики осьових і відцентрових компресорів. Надано обґрунтування вибору системи координат для подання характеристик ГТД та його вузлів і запропоновані їх перетворення, що суттєво спрощує процедури ідентифікації моделей.

Наведені формули і алгоритми для визначення фактичної потужності ГТДтаУ в умовах експлуатації та коефіцієнтів технічного стану ГПА, що отримані з використанням запропонованих математичних моделей.

Ключові слова: газотурбінний двигун та установка, відцентровий компресор, газоперекачувальний агрегат, математична модель, характеристики.

АННОТАЦИЯ

Нурмухаметов Т.М. Определение характеристик газотурбинных двигателей и установок в эксплуатационных условиях на основе математического моделирования. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.16 – турбомашини и турбоустановки. – Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, «ХАИ», Харьков, 2008 г.

Диссертация посвящена определению действительных характеристик ГТДиУ и его узлов в эксплуатационных условиях на основе математического моделирования.

В результате анализа существующих в газовой промышленности методик определения теплотехнических параметров ГПА и оценки их технического состояния установлено, что их получение проводится с использованием "базовых" характеристик ГТДиУ как внешних, так и дроссельных, применение которых приводит к значительным

погрешностям при вычислении. Кроме того, номенклатура газодинамических параметров, которые измеряются штатными системами контроля работы ГПА, ограничена и не позволяет непосредственно определять характеристики приводов ГПА. Следовательно, существует необходимость определения характеристик в эксплуатационных условиях с применением математического моделирования.

При анализе опубликованных работ по математическому моделированию ГТД и его узлов установлено, что они посвящены в основном разработке математических моделей, которые, ввиду их сложности неприемлемы для условий эксплуатации. Но было выяснено, что преобразование систем координат позволяет значительно упростить представление характеристик ГТД и его узлов.

В работе на основе теоретического анализа и обобщения статистических данных получены математические модели ГТДиУ с регулируемым и нерегулируемым сопловым аппаратом силовой турбины, с регенерацией и без регенерации тепла, отличающиеся внутренней организацией. Проведено сопоставление полученных моделей с опытными характеристиками ГТД различного назначения и подтверждена их адекватность. Предложены новые методики идентификации адаптивных моделей ГТД и его узлов с применением методов ортогонального планирования эксперимента. Обоснован выбор систем координат для представления характеристик ГТД и его узлов зависимости от их использования в математических моделях ГТДиУ. Усовершенствована математическая модель центробежного компрессора-нагнетателя.

Предложена методика для определения параметров ГТДиУ и оценки технического состояния ГТД на основе разработанных моделей, что позволяет рационально использовать ГПА на компрессорных станциях и своевременно проводить профилактические и восстановительные работы.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель и установка, центробежный компрессор, газоперекачивающий агрегат, математическая модель, характеристики.

ABSTRACT

Nurmukhametov T.M. GTE specifications in operating mode, basing on the mathematical modeling. – Manuscript.

Thesis for the Candidate of Technics grade in the Specialty 05.05.16 – Turbomachines and Turboinstallation - M.E. Zhukovskyy National Airspace University „Kharkiv Aviation Institute“, Kharkiv 2008.

This Thesis's purpose is evaluation of the GTE and its elements characteristics in operating mode, basing on the mathematical modeling. Diverse-level mathematical models were designed: controlled and non-controlled power turbine nozzle diaphragms turboshaft GTE, regenerative and regenerative-free GTE. The received GTE mathematical models were compared with the pilot specifications, and thus their adequacy was proved. Techniques for the gas-dynamic properties calculation of the GTE with the incomplete measuring by the GCU existing standard control systems were proposed. Approximation characteristics were improved both for the axial flow and centrifugal compressors. The coordinate system choice was provided for the GTE and its elements characteristics' presentation, the conversion aimed at the models' identification simplifying was proposed. Here we can find formulas and algorithms for the GTE's active power evaluation during their operation, as well as for the GCU's operating conditions coefficients, received due to the proposed economic models.

Key words: gas turbine engine, centrifugal compressor, gas compressor unit, mathematical model, characteristics