Висновок. Реалізація наведених способів імітації трясіння й вібрації під час руху ЛА на критичних кутах атаки, по землі, відхиленні інтерцепторів від носового стояка шасі, та двигунів в імітаторах акселераційних діянь тренажерів літаків Іл-96-300, Ту-204 [1] та Ан-74ТК-200 [2] показала їх високу ефективність і була позитивно оцінена пілотами.

Список літератури

1. *Сотников Д.А., Кабанячий В.В.* Программная реализация в цифровом варианте циклического закона управления (ЦЗУ-6) шестистепенным динамическим стендом в составе авиационных тренажеров неманевренных самолетов Ту-204, Ил-96-300. Утв. зам. начальника ГлавНТУ МГА. – М.: 1989. – 163 с.

2. *Исследования* ДС6-1,5 и реализация ЦЗУ в составе имитатора акселерационных воздействий ИПС-74ТК-200: Отчет о НИР/ КИИГА; *Д.А. Сотников, В.В. Кабанячий и др.* №ГР 0195U025224. Коммерческие секреты. – К., 1998. – 130 с.

Стаття надійшла до редакції 10.04.02.

УДК 629.7.048.7:629.048.3

О.І. Хлистун, канд. техн. наук, доц.

КАБІНА ПОВІТРЯНОГО СУДНА ЯК РЕГУЛЬОВАНИЙ ОБ'ЄКТ ЗА ТЕМПЕРАТУРОЮ БОРТОВОЇ СИСТЕМИ КОНДИЦІЮВАННЯ ПОВІТРЯ

Розглянуто кабіну повітряного судна у вигляді двох послідовно увімкнених аперіодичних кілець першого порядку, враховуючих акумулюючу дію повітря і обладнання в ній, і кільця диференціючого типу. Для кабіни як регульованого об'єкта за температурою в ній отримано передаточні функції за регулюючою і збурюючою діями.

Вступ. У системах кондиціювання повітря (СКП) повітряного циклу можуть бути вирізнені підсистеми, пов'язані одна з іншою, як вказано на рис. 1. Підсистеми взаємодіють з двигуном, атмосферним повітрям, який використовується для охолодження, і кабіною повітряного судна (ПС).

Рис. 1. Функціональна схема СКП літака

У підсистемі відбору повітря здійснюється обмеження тиску, витрати і температури робочого повітря СКП.

У підсистемі охолодження температура повітря СКП частково знижується за рахунок відведення тепла в атмосферу. Подальше її зниження здійснюється в результаті розширення повітря на турбіні. Максимальна холодопродуктивність СКП отримується при проходженні всього робочого повітря через турбіну. Регулювання холодопродуктивності СКП, або робота її на обігрів, забезпечу-

ється за рахунок обведення частини гарячого повітря турбіни і здійснюється системою автоматичного регулювання температури (САРТ). У ній установлюється температура робочого повітря СКП, яка забезпечує температуру повітря в кабіні , що дорівнює заданій (рис. 2).

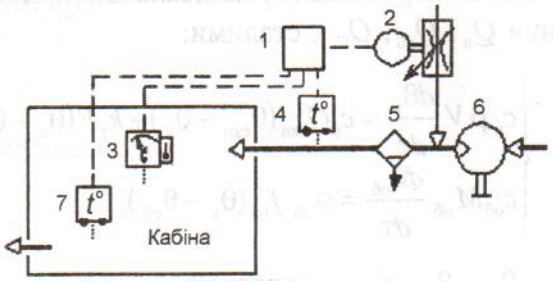

Рис. 2. Схема однозонної САРТ:
1 – регулятор температури; *2* – заслінка підмішування гарячого повітря; *3* – задатчик температури; *4* – датчик температури робочого повітря; *5* – вологовідокремлювач; *6* – турбіна; *7* – датчик температури повітря в кабіні

У схему СКП при необхідності може бути включена рециркуляція.

Визначення структури передаточних функцій кабіни ПС. Кабіна ВС є кільцем у контурі САРТ бортової СКП, і теплові динамічні характеристики кабіни суттєво впливають на процеси регулювання температури повітря в ній. Тому при виборі типу і параметрів регулятора при проектуванні САРТ необхідно, перш за все, знати передаточні функції кабіни ПС як теплового об'єкта (рис. 3).

На рис. 4 наведено спрощену структурну схему регульованого об'єкта.

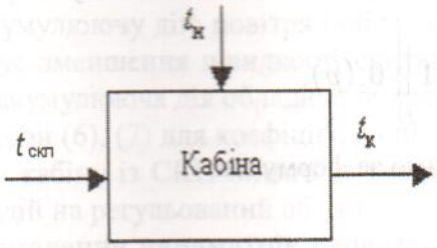

Рис. 3. Схема кабіни ПС як регульованого об'єкта за температурою

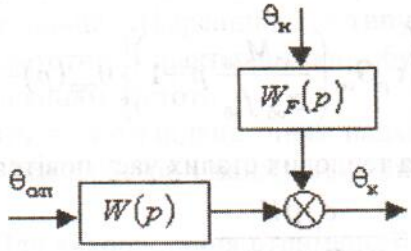

Рис. 4. Структурна схема регульованого об'єкта

Структуру передаточних функцій кабіни визначимо на основі математичної моделі кабіни ПС як двоємнісного теплофізичного об'єкта, розрахунки за якою нестаціонарних температурних умов у кабіні при кондиціонуванні дають результати, близькі до даних натурних випробувань. Ця модель для однооб'ємної кабіни запропонована А.М. Гершковичем, на її базі в роботі [1] було змодельовано багатооб'ємну кабіну.

Нестаціонарні рівняння теплового балансу для температури повітря і температури обладнання всередині кабіни ПС мають вигляд:

$$\begin{cases} c_p \rho V \dfrac{d t_к}{d\tau} = c_p G_{скп}(t_{скп} - t_к) + k_e F(t_a - t_к) + \alpha_{об} f_{об}(t_{об} - t_к) + Q_л + Q_{об} + Q_C; \\ c_{об} M_{об} \dfrac{d t_{об}}{d\tau} = \alpha_{об} f_{об}(t_к - t_{об}), \end{cases} \quad (1)$$

де c_p, $c_{об}$ – питомі теплоємності повітря і обладнання; ρ – густина повітря в кабіні; V – об'єм кабіни; $t_к$ – температура повітря в кабіні (регульований параметр); $G_{скп}$ – витрата повітря із СКП; τ – поточний час; $t_{скп}$ – температура робочого повітря СКП (регулююча дія); k_e, $\alpha_{об}$ – коефіцієнти теплообміну повітря в кабіні з атмосферою і обладнанням; F, $f_{об}$ – площі поверхонь теплообміну огороджувальних конструкцій і обладнання; t_a – температура атмосферного повітря (збурююча дія); $t_{об}$ – температура обладнання; $Q_л$, $Q_{об}$ – тепловиділення людей і обладнання; Q_C – теплонадходження через огороджувальні конструкції, обумовлені соняшною радіацією; $M_{об}$ – маса обладнання.

Тепловиділення людей і обладнання, теплонадходження, обумовлені сонячною радіацією, конструктивні і теплофізичні характеристики кабіни, теплофізичні властивості і витрати повітря із СКП вважаємо сталими.

Система рівнянь (1) записана для прирощень температур з урахуванням того, що тепловиділення $Q_л$, $Q_{об}$, $Q_С$ є сталими:

$$\begin{cases} c_р \rho V \dfrac{d\theta_к}{d\tau} = c_р G_{скп}(\theta_{скп} - \theta_к) + k_е F(\theta_а - \theta_к) + \alpha_{об} f_{об}(\theta_{об} - \theta_к); \\ c_{об} M_{об} \dfrac{d\theta_{об}}{d\tau} = \alpha_{об} f_{об}(\theta_к - \theta_{об}), \end{cases} \quad (2)$$

де $\theta_к$, $\theta_{об}$, $\theta_а$, $\theta_{скп}$ – прирощення температур повітря в кабіні, обладнання, атмосфери, повітря, яке надходить у кабіну із СКП, відповідно.

Залежність регульованого параметра від регулюючої і збурюючої дій після зведення системи (1) до диференціального рівняння другого порядку за допомогою прямого перетворення Лапласа може бути подана в операторній формі [2]:

$$\left\{ c_p \rho V \frac{c_{об} M_{об}}{\alpha_{об} f_{об}} p^2 + \left[c_p \rho V + \left(k_е F + c_p G_{скп} + \alpha_{об} f_{об}\right) \frac{c_{об} M_{об}}{\alpha_{об} f_{об}} \right] p + \left(k_е F + c_p G_{скп}\right) \right\} \theta_к(p) =$$

$$= \left\{ c_p G_{скп} \left(\frac{c_{об} M_{об}}{\alpha_{об} f_{об}} p + 1 \right) \right\} \theta_{скп}(p) + \left\{ k_е F \left(\frac{c_{об} M_{об}}{\alpha_{об} f_{об}} p + 1 \right) \right\} \theta_a(p). \quad (3)$$

Для теплових сталих часу повітря в кабіні обчислимо за формулою

$$\tau_к = \frac{c_p \rho V}{k_е F + c_p G_{скп}}, \quad (4)$$

обладнання:

$$\tau_o = \frac{c_{об} M_{об}}{\alpha_{об} f_{об}}; \qquad \tau_{ок} = \frac{c_{об} M_{об}}{k_e F + c_p G_{скп}}. \quad (5)$$

Коефіцієнт підсилення за регулюючою дією позначимо:

$$K = \frac{1}{1 + \dfrac{k_е F}{c_p G_{скп}}}, \quad (6)$$

за збурюючою дією:

$$K_F = \frac{1}{1 + \dfrac{c_p G_{скп}}{k_е F}}. \quad (7)$$

З урахуванням формул (4)–(7) операторне рівняння (3) зобразимо у вигляді:

$$\left\{\tau_к \tau_o p^2 + (\tau_к + \tau_o + \tau_{ок}) p + 1\right\} \theta_к(p) = \left\{K(\tau_o p + 1)\right\} \theta_{скп}(p) + \left\{K_F(\tau_o p + 1)\right\} \theta_а(p). \quad (8)$$

Оскільки

$$(\tau_к + \tau_o + \tau_{ок}) > 2\sqrt{\tau_к \tau_o},$$

то операторний вираз для $\theta_к(p)$ у рівнянні (8) можна записати у вигляді:

$$(T_1\,p+1)\cdot(T_2\,p+1),$$

де сталі часу T_1, T_2 – корні операторного виразу для $\theta_к(p)$:

$$T_{1,2}=\frac{(\tau_к+\tau_о+\tau_{ок})}{2}\pm\sqrt{\frac{(\tau_к+\tau_о+\tau_{ок})^2}{4}-\tau_к\tau_о}\ ,$$

передаточна функція кабіни за регулюючою дією має вигляд:

$$W(p)=\frac{\theta_к(p)}{\theta_{скв}(p)}=K\,\frac{1+\tau_о\,p}{(T_1\,p+1)\cdot(T_2\,p+1)}, \qquad (9)$$

Передаточна функція за збурюючою дією:

$$W_F(p)=\frac{\theta_к(p)}{\theta_а(p)}=K_F\,\frac{1+\tau_о\,p}{(T_1\,p+1)\cdot(T_2\,p+1)}. \qquad (10)$$

Передаточні функції (9), (10) – ідентичні, різниця лише в значеннях коефіцієнтів підсилення, які пов'язані співвідношенням: $K=1-K_F$.

З вигляду функцій (9), (10) можна зробити висновок, що кабіна являє собою три послідовно увімкнених кільця, два з яких є аперіодичними кільцями першого порядку, що враховують акумулюючу дію повітря і обладнання в ній, і одне кільце диференціючого типу, яке характеризує зменшення швидкості спадання амплітудно-частотної характеристики, обумовлене тим, що акумулююча дія обладнання зменшується з підвищенням частоти.

Вирази (6), (7) для коефіцієнтів підсилення показують те, що з підвищенням надходження повітря в кабіну із СКП підвищується вплив зміни його температури і знижується вплив збурюючих дій на регульований об'єкт.

Визначення параметрів передаточних функцій. Для використання отриманого математичного опису передаточних функцій кабіни необхідно знати характеристики теплообміну кабіни $k_e F$ та обладнання $\alpha_{об} f_{об}$ і повну теплоємність обладнання $c_{об} M_{об}$.

Еквівалентний коефіцієнт теплопередачі огороджувальних конструкцій k_e визначається як середньозважена величина коефіцієнтів теплопередачі k_i окремих огороджувальних конструкцій:

$$k_e=\frac{\sum_i k_i F_i}{F=\sum_i F_i}.$$

Коефіцієнт k_i зазвичай визначається як для плоскої багатошарової стінки розрахунком на базі методик, наведених у монографіях [3; 4].

Значення $c_{об} M_{об}$ можна розрахувати, знаючи масу обладнання й елементів конструкції і питому теплоємність застосованих конструкційних матеріалів, котра звичайно знаходиться в межах від 630 до 760 Дж/(кг · К).

Оскільки визначити величину $\alpha_{об} f_{об}$ теоретично достовірно неможливо, вона розраховується за відомими значеннями $c_{об} M_{об}$ і тепловою характеристикою обладнання, зворотною тепловою сталою часу:

$$I_t=\frac{1}{\tau_о}=\frac{\alpha_{об}\,f_{об}}{c_{об}\,M_{об}},$$

яка визначається як емпірична величина за даними випробувань ПС у нестаціонарних температурних умовах при кондиціюванні кабіни на землі.

Передаточні функції для кабін пасажирського регіонального літака. Для сталих часу T_1, T_2 і коефіцієнтів підсилення K, K_F за регулюючою і збурюючою діями визначення для кабіни екіпажу і пасажирського салону як регульованих об'єктів за температурою. Було використано технічні дані літака Ан-140 (див. таблицю).

Теплові характеристики і сталі часу для літака Ан-140

Теплова характеристика	Кабіна екіпажу	Пасажирський салон
I_t, 1/с	$7{,}64 \cdot 10^{-4}$	$4{,}58 \cdot 10^{-4}$
τ_o, с	1309	2182
$\tau_к$, с	101	146
$\tau_{ок}$, с	5434	3463
T_1, с	6825	5735
T_2, с	19,5	55,4
K	0,83	0,72
K_F	0,17	0,28

Висновок. На базі подання кабіни повітряного судна як двоємнісного об'єкта, який враховує акумулюючу дію повітря і обладнання в ній, для кабіни як регульованого об'єкта за температурою повітря отримано передаточні функції за температурою повітря на виході СКП як за регульованою дією і за температурою атмосферного повітря як збурюючою дією.

Сталі часу і передаточні функції визначені для кабіни екіпажу і пасажирського салону пасажирського регіонального літака типу Ан-140.

Список літератури

1. *Хлистун А.И., Щербаков Ю.Н.* Расчет изменения температуры воздуха в кабинах транспортного самолета при наземном кондиционировании // Авиационная промышленность. – 1992. – № 8. – С. 5–6.

2. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. – М.: Наука, 1975.– 767 с.

3. *Быков Л.Т., Ивлентиев В.С., Кузнецов В.И.* Высотное оборудование пассажирских самолетов. – М.: Машиностроение, 1972. – 331 с.

4. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

Стаття надійшла до редакції 30.03.02.