

УДК 629.735.083.02.004.58(045)

Єнчев С.В., канд. техн. наук

## ПРЯМИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ЯКОСТІ В ЗАДАЧАХ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ АВІАДВИГУНАМИ

Аерокосмічний інститут  
Національного авіаційного університету

*У статті розглянута можливість оцінки технічного стану систем автоматичного керування авіадвигунами за узагальненим показником сформованого на основі прямого методу оцінки якості функціонування логіко-динамічних систем.*

### **Постановка проблеми**

При рішенні задач синтезу систем автоматичного керування двигунами повітряного корабля (САКД ПК) і практичної їх реалізації в умовах авіапідприємств виникає проблема оцінки якості цих систем, оскільки працездатність блоків не гарантує працездатності всієї системи. Завдання на етапах життєвого циклу в значній мірі відрізняються, але в своєму розвитку їх сукупність підпорядкована цільовій функції – створенню інформаційної технології відновлення характеристик САКД. Для умов авіапідприємств особливий інтерес представляє метод, заснований на визначенні функціонала якості як суми інтеграла, заданої позитивної квадратичної форми фазових координат і значення іншої квадратичної форми цих координат у кінці даного інтервалу при фіксованих початкових значеннях координат.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій, постановка завдання**

Алгоритм синтезу САК на основі мінімізації цього функціонала при введенні додаткових обмежень детально розглянутий А.А. Красовським [1]. Непрямі методи оцінки САК [2, 3] мають якісний характер і не дають можливості кількісно оцінити такі основні критерії якості САК, як швидкодія і точність. Як правило, вони не дозволяють однозначно визначити форму перехідного процесу, що зумовлює істотну невизначеність у вирішенні задачі. При цьому оптимальним перехідним процесом вважатиметься процес, максимально наближений до вхідного збурення типу

«стрибок» при відтворенні регульованої величини, що для САКД неприпустимо.

У цьому разі метод прямої оцінки [4-6] дозволяє найточніше і наглядно оцінити якість САК шляхом побудови перехідного процесу. Він не знайшов широкого розповсюдження через складність обчислень, особливо коренів характеристичних рівнянь, що на теперішній час можуть бути подолані використанням автоматизованих технологій. Завдяки цьому можна точно оцінити якість САКД за виглядом перехідного процесу. У цьому разі можливе вирішення дуже важливої задачі – діагностування і прогнозування систем автоматичного керування без порушення їх функціонування, тобто без розривів зворотних зв'язків у процесі використання за призначенням. Цей чинник є принципово важливим, оскільки метод реалізується сучасними засобами при високому рівні «безпечних» відмов і несправностей систем.

### **Побудова динамічної моделі системи автоматичного керування двигунами СУ-77 по каналу керування гвинтовентилятором**

Основні теоретичні положення реалізації методу по формуванню частинних і узагальненого показників якості (ОПК) «САКД – ПК» викладені [4], де одержані умови справного, працездатного і частково працездатного станів складних систем логіко-динамічного класу.

Розглянемо задачу формування ОПК каналу керування частотою обертання гвинтовентилятора системи СУ-77. Канал керування складається з наступних дина

мічних ланок:

1 – програмний задатчик швидкості обертання (ЕСУ-27);

2 – вимірювальний пристрій 1 (датчик положення важеля керування двигуном  $\alpha_{p\gamma d}$ );

3 – вимірювальний пристрій 2 (датчик швидкості обертання турбіни гвипто-вентилятора  $n_{TBV}$ );

4 – гідропідсилювач;

5 – виконавчий механізм (гідропри-від);

6 – власне авіаційний двигун; Передавальні функції динамічних ланок:

1. Передавальну функцію програмного задатчика можна представити у вигляді ланки чистого запізнювання:

$$W_{\text{ЕСУ}}(p) = e^{-\tau p},$$

де постійна запізнювання  $\tau$  визначається частотою виконання алгоритму,  $\tau = 0,01$  с.

2. Як вимірювач  $\alpha_{p\gamma d}$  використовується датчик ДБСКТ-250-1. Передавальну функцію якого можна представити у вигляді пропорційної ланки:

$$W_{\alpha}(p) = k_1.$$

3. Як вимірювач  $n_{TBV}$  використовується датчик ДТА-13. Передавальну функцію якого можна представити у вигляді пропорційної ланки:

$$W_n(p) = k_2.$$

4. Передавальна функція гідропідсилювача з гідроприводом (гідрорегулятор) є реальною пропорційно-інтегруючою ланкою [7]:

$$W_p(p) = \frac{k_p}{T_p p + 1} \left( 1 + \frac{1}{T_u p} \right),$$

де  $k_p$  – коефіцієнт підсилення регулятора, що характеризує ефективність пропорційної складової алгоритму його роботи;  $T_u$  – постійна часу, що характеризує при заданому  $k_p$  швидкодію інтегральної

складової алгоритму;  $T_p$  – постійна часу, що характеризує інерційність регулятора.

Рівняння динаміки регулятора, що пов'язує формовану їм керуючу дію  $m_p$  з розузгодженням, має вигляд:

$$m_p(p) = \frac{k_p}{T_p p + 1} \left( 1 + \frac{1}{T_u p} \right) \times \\ \times \Delta n_{BB}(p) = m_n + m_u,$$

де  $m_n(p) = \frac{k_p}{T_p p + 1} \cdot \Delta n_{BB}(p)$  – пропорційна

складова керуючої дії гідропідсилювача, що формується статичною частиною регулятора;

$$m_u(p) = \frac{k_p}{T_u p (T_p p + 1)} \cdot \Delta n_{BB}(p) \text{ – інтег-}$$

ральна складова керуючої дії гідропідсилювача, що формується астатичною частиною регулятора.

5. Динамічні властивості двигуна можна виразити через аперіодичну ланку [7]:

$$W_m(p) = \frac{k_m}{T_m p + 1}.$$

Динамічна модель системи СУ-77 по каналу керування швидкістю обертання гвинтовентилятора наведена на рис. 1.

Нехтуючи ланкою чистого запізнювання, з причини малого значення постійної запізнювання, провівши необхідні перетворення, одержимо динамічне рівняння каналу керування:

$$(a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0) \cdot n_{BB}(p) = \\ = (b_1 p + b_0) \cdot \alpha_{p\gamma d}(p),$$

де

$$a_3 = T_u T_p T_m; \quad a_2 = T_u (T_p + T_m);$$

$$a_1 = T_u (1 + k_2 k_m k_p); \quad a_0 = k_2 k_m k_p;$$

$$b_1 = T_u k_1 k_m k_p; \quad b_0 = k_1 k_m k_p,$$

а передавальна функція системи

$$\Phi_{\alpha}^n(p) = \frac{n_{BB}(p)}{\alpha_{p\gamma d}(p)} = \frac{b_1 p + b_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}.$$

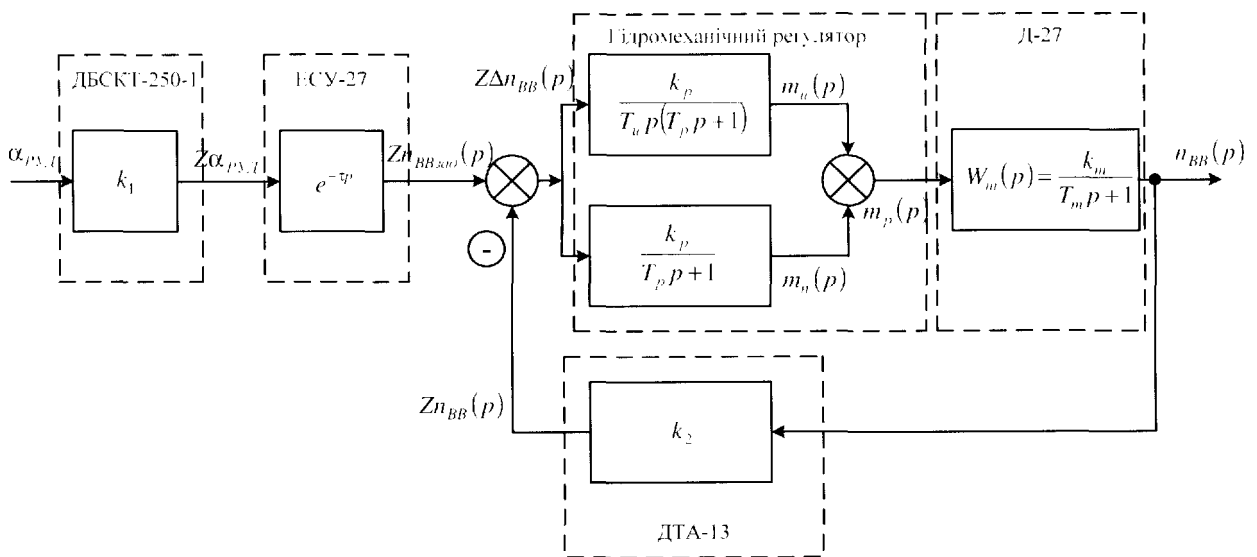


Рис. 1. Динамічна модель системи СУ-77 по каналу керування швидкістю обертання гвинтовентильатора

Рівняння, що описує динаміку каналу керування, включас два регульовані параметри  $k_p, T_m$  і при додаванні до нього ОПК [4] виявляється, що шукана область безвідмовної роботи представляється тривимірною фігурою.

Системи автоматичного керування двигунами відносяться до структурно та параметрично стійких систем. Тому можливі два випадки розташування коренів характеристичного рівняння третього ступеня на комплексній площині.

1. Три корені дійсні:  $p_1, p_2, p_3$ .
2. Один корінь дійсний і пара комплексно-зв'язаних коренів:  $p_1, \alpha \pm j\beta$ .

Функція перехідного процесу для відхилення розраховується за формулами [4, 5]:

1. Для випадку трьох дійсних коренів:

$$n_{BB}(t) = W_1 e^{p_1 t} + W_2 e^{p_2 t} + W_3 e^{p_3 t} = \sum_{n=1}^3 \frac{b_1 p_n + b_0}{3a_3 p_n^2 + 2a_2 p_n + a_1} e^{p_n t}$$

2. Для випадку одного дійсного та двох комплексно-зв'язаних коренів:

$$n_{BB}(t) = W_1 e^{p_1 t} + V e^{\alpha t} \sin(\beta t + S) = \frac{b_1 p_1 + b_0}{3a_3 p_1^2 + 2a_2 p_1 + a_1} e^{p_1 t} +$$

$$+ \frac{2b_1 \cdot e^{\alpha t} \sin \left[ \beta t + \arctg \left( -\frac{C_1}{C_2} \right) \right]}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2}}$$

де

$$C_1 = 3a_3(\alpha^2 - \beta^2) + 2a_2\alpha + a_1;$$

$$C_2 = 6a_3\alpha\beta + 2a_2\beta.$$

### Формування узагальненого показника якості функціонування САКД

Перехідні процеси в замкнутих САКД викликані наявністю інерції видів енергії (електромагнітної, електромеханічної, гідромеханічної, пневматичної, теплової і т. д.), час протікання процесів значно відрізняється один від одного. Розширений перелік показників якості, використовуваний в практиці та теорії оцінювання якості відповідності САКД [4] нормативним вимогам, включас ряд показників:

- час першого узгодження;
- час досягнення першого максимуму;
- амплітуда першого викиду;
- час перехідного процесу;
- установлене значення параметра;
- частота коливань;
- перерегулювання;
- середньоквадратичне значення параметра;
- затухання;

- похибка у сталому процесі (статична похибка).

- Стосовно задачі формування ОПК системи САКД з аналізу ряду робіт і нормативно-технічної документації, основними показниками якості перехідного процесу, що визначають з високою мірою достовірності характер і параметри кривої перехідного процесу, можуть служити наступні показники:

- відношення амплітуд другого і першого викидів  $\mu = M_2 / M_1$ ;

- перерегулювання  $\sigma = M_1 / \gamma_0$  при вхідному одиничному стрибку  $[\gamma_0] = 1$   $\sigma = M_1$ ;

- відносна частота власних коливань  $\bar{\omega}_c = t_{cp} / t_{coo}$ ;

- час регулювання  $t_{pec}$ .

На рис. 2. розглянуто керування швидкістю обертання гвинтовентилятора на вхідну дію – зміна положення важеля керування двигуном, вихідна величина зміна швидкості обертання турбіни гвинтовентилятора  $n_{TBV}$ , де  $t_{cp}$  – час зрізу перехідного процесу,  $t_{coo}$  – час власних коливань;  $t_{pec}$  – час регулювання,  $\varepsilon$  - ширина трубки допусків. Для кожного вибраного показника необхідно вибрати його оптимальні та граничні значення, а також задати ширину трубки допусків  $\varepsilon$ , що визначають точність. Нормативно-технічна документація для СУ-77 визначає наступні обмеження:

$$\mu^{opt} = \mu^{min} = 0; \quad \varepsilon / n_{TBV0} = 0,005;$$

$$t_{per}^{opt} = (t_{per}^{max} + t_{per}^{min}) / 2;$$

$$\sigma^{opt} = \sigma^{min} = 0,005; \quad \bar{\omega}_c^{opt} = \bar{\omega}_c^{min} = 0,$$

де  $n_{TBV0}$  – сталі значення тяги;  $\varepsilon / n_{TBV0} = 0,005$  – визначає допуск на точність регулювання САКД;  $\mu^{opt} = \mu^{min} = 0$  - свідчить про недопустимість коливань, а точніше про появу другого максимуму;  $\sigma^{opt} = \sigma^{min} = 0,005$  – перерегулювання допустимо тільки в межах допуску на точність регулювання САУ.

Умову  $\mu^{opt} = 0$  слід розуміти як рівність нулю другого мінімуму (перехідний процес без другого викиду) незалежно від того, чи має перехідний процес перший викид чи ні. Останній вираз  $\bar{\omega}_c^{opt} = 0$  слід розуміти як виконання умови, при якій  $t_{coo}$  прагне до нескінченності.

Пропонується побудувати критерій  $K_i$  так, щоб графічно він представляв пряму, що починається в точці  $(\Pi_i^{opt}, 1)$ , і що проходить через точку  $(\Pi_i^{pr}, 0)$ . Тут  $\Pi_i^{opt}$ ,  $\Pi_i^{pr}$  позначають відповідно оптимальне і граничне значення даного показника якості перехідного процесу. Графік залежності критерію  $K_i$  від показника якості  $\Pi_i$  зображений на рис. 3, і як впливає з графіка, критерій  $K_i$  рівний для оптимальної величини  $\Pi_i$  одиниці, для граничної – нулю, для недопустимої – менше нуля.

Аналітично критерій  $K_i$  можна виразити як:  $K_i = 1 - \frac{|\Pi_i^{opt} - \Pi_i|}{\Pi_i^{pr} - \Pi_i^{opt}}$ , що для вибраних показників якості виглядає таким чином:

$$K_1 = 1 - \frac{|\mu^{opt} - \mu|}{\mu^{pr} - \mu^{opt}}; \quad K_1 = 1 - \frac{\mu}{\mu^{pr}} \Rightarrow 1;$$

$$K_2 = 1 - \frac{|\sigma^{opt} - \sigma|}{\sigma^{pr} - \sigma^{opt}}; \quad K_2 = 1 - \frac{\sigma}{\sigma^{pr}} \Rightarrow 1;$$

$$K_3 = 1 - \frac{|\bar{\omega}_c^{opt} - \bar{\omega}_c|}{\bar{\omega}_c^{pr} - \bar{\omega}_c^{opt}}; \quad K_3 = 1 - \frac{\bar{\omega}_c}{\bar{\omega}_c^{pr}} \Rightarrow 1;$$

$$K_4 = 1 - \frac{|t_p^{opt} - t_p|}{t_p^{pr} - t_p^{opt}}; \quad K_4 = 1 - \frac{t_p}{t_p^{pr}} \Rightarrow 1.$$

Оцінку якості САКД пропонується здійснювати по ОПК, рівному

$$ОПК = \begin{cases} K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4, & \forall K_i \geq 0 \\ -1, & \exists K_i < 0. \end{cases}$$

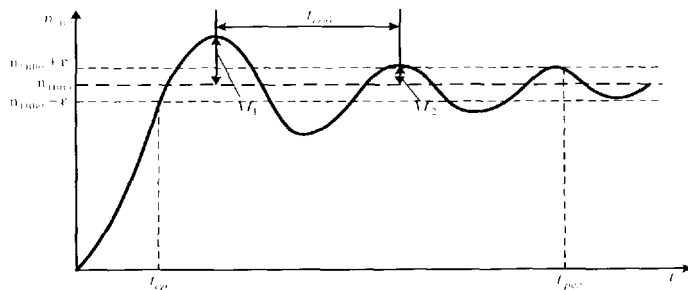


Рис. 2. Графік перехідного процесу САКД по каналу керування швидкістю обертання турбіною гвинтовентилятора

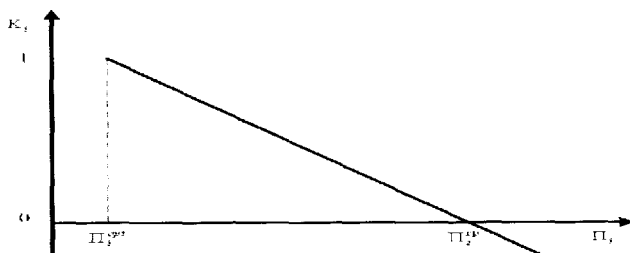


Рис. 3. Залежність критерію якості  $K_1$  від показника якості  $\Pi_1$  перехідного процесу САКД

Якість функціонування САКД визначається інтервалом  $[0, 1]$ , при  $0 < \text{ОПК} < 1$  перехідний процес протікає з втратою ефекту функціонування; при  $\text{ОПК} = 1$  перехідний процес має бажаний характер (оптимальний процес). При  $\text{ОПК} = -1$  згідно критеріям формулювання в системі наступас відмова (непрацездатні стани). *Визначення області безвідомої роботи у площині параметрів системи*

На підставі приведених формул розраховується крива перехідного процесу, а потім визначаються її показники. Такі показники якості перехідного процесу, як перший і другий мінімум (викиди), час спрацьовування або регулювання можна обчислити методами алгебри, проте, у даному випадку скористалися методом перебору, що особливо легко організову-

ється за допомогою ЕОМ. Згідно проведеним математичним викладенням, проведемо розрахунок перехідного процесу і ОПК за допомогою пакету системи символної математики *MathCAD 11A* [8]. Залежність ОПК від регульованих параметрів  $k_p, T_u$  зображена на рис. 4. Значення  $\text{ОПК} \geq 0,95$  на поверхні виділені як підобласть настройки – ПОН. Для точки з ПОН побудована крива перехідного процесу (рис. 5), яка відповідає сформульованим обмеженням на якість перехідного процесу для системи СУ-77 і відображає не близький до стрибкоподібного перехідний процес, а монотонний перехідний процес із заданими параметрами.

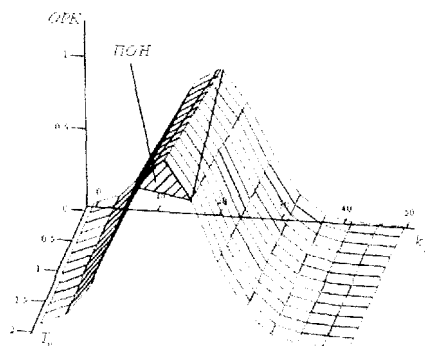


Рис. 4. Залежність узагальненого показника якості від регульованих параметрів  $k_p, T_u$

## Висновки

Застосування математичного моделювання дозволяє ідентифікувати задачу оцінки технічного стану «САКД – ПК». Величина ОПК завжди лежить в межах  $0 \leq \text{ОПК} \leq 1$  або рівна -1 і вона тим більше, чим краще якість регулювання «САКД – ПК». При  $\text{ОПК}=1$  має місце оптимальний перехідний процес з погляду прийнятих показників якості; при  $\text{ОПК}=0$  – граничний і при  $\text{ОПК}=-1$  непрацездатний стан системи.

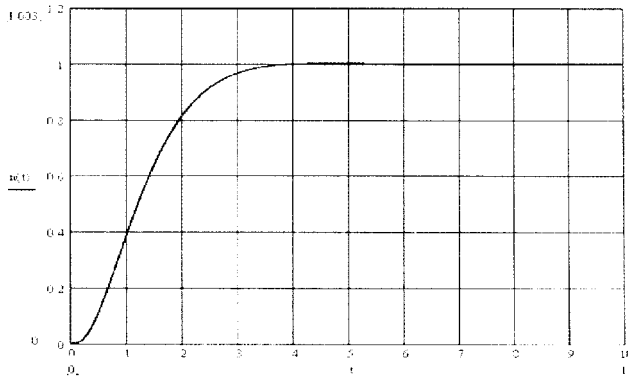


Рис. 5. Графік реакції каналу керування швидкістю обертання гвинтовентилятором на стрибкоподібну дію  $\alpha_{\text{РВД}}$

## Список літератури

1. Красовский А.А. Автоматическое конструирование контуров управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1969. – 240 с.
2. Козлов В.И. Системы автоматизированного управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
3. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. – М.: Машиностроение, 1978. – 738 с.
4. Формирование обобщенного показателя качества функционирования логико-динамических систем авионики в задачах идентификации интегрированных автоматизированных систем управления авиапредприятий / Воробьев В.М., Захарченко В.А., Енчев С.В., Кондратенко С.В. // Електроніка та системи управління. – 2005. – Вип. – С. 106 – 117.

При такій постановці завдання вже на етапі заводського контролю з'являється можливість впливати на надійність системи шляхом підвищення її параметричного резервування до необхідного рівня, тобто підвищення безвідмовності системи оптимальним вибором її параметрів. Розроблений метод і засоби математичного моделювання є ефективним способом оцінювання рівня параметричного резервування складних динамічних систем в умовах проектних організацій.

5. Воробьев В.М., Вуйцик В. Критерии качества систем автоматического управления полетом воздушных судов // Вопросы оптимального обслуживания и ремонта АиРЭО воздушных судов гражданской авиации. Сб. науч. тр. – К.: КИИГА, 1985. – С. 83 – 87.
6. Мартин Ф. Моделирование на вычислительных машинах. – М.: Сов. радио, 1987. – 285 с.
7. Климентовский Ю.А. Системы автоматического управления силовыми установками летательных аппаратов. – К.: КВИЦ, 2001. – 400 с.
8. Кирьянов Д.В. Самоучитель Math-CAD11. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 560 с.