

УДК 629.735.067 (045)

## ФУНКЦІОНАЛ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ КЕРОВАНОСТІ ТА СТІЙКОСТІ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА В УМОВАХ ВИНИКНЕННЯ ОСОБЛИВОЇ СИТУАЦІЇ У ПОЛЬОТІ

*В. М. Казак*, д-р техн. наук; *Д. О. Шевчук*, канд. техн. наук

Національний авіаційний університет

do@nau.edu.ua

*Запропоновано узагальнений функціонал ефективності, який системно враховує реконфігурацію керуючих поверхонь, а також сумарні витрати на контроль, діагностування, прогнозування, керування під час виникнення особливої ситуації в польоті. Наведений функціонал ефективності дає змогу оцінити поточну ефективність виконання поставленого польотного завдання в умовах виникнення несприятливих зовнішніх збурень та деградуючих внутрішніх процесів.*

**Ключові слова:** реконфігурація, керованість, літак, особлива ситуація, система контролю та діагностування.

*The functional of efficiency, which system takes into reconfiguration of control surfaces, total charges, on control, diagnosing, prognostic, controlling, during the special situation on flight is offered. The functional of efficiency allows to estimate current efficiency in the conditions unfavorable external indignations and degrading internal processes.*

**Keywords:** reconfiguration, controllability, airplane, special situation, control and diagnostic system.

### Вступ

Літальний апарат (ЛА) як складна технічна система, що працює в реальному часі, часто за апіорно не повністю визначених режимів і умов застосування для ефективного використання має бути наділений властивостями високої надійності та живучості.

Обидва ці поняття пов'язані з працездатністю ЛА в часі, тобто з виконанням заданих функцій в установленому обсязі з потрібним рівнем якості протягом визначеного терміну його експлуатації або в довільний момент часу.

Поточна польотна ситуація, в першу чергу, характеризується: умовами і режимом польоту, функціональним станом екіпажу, працездатністю авіаційних систем та аеродинамічним станом несучої поверхні.

У результаті дії несприятливих зовнішніх несприятливих чинників і деградуючих внутрішніх процесів може виникнути особлива польотна ситуація, яка підрозділяється на чотири види: ускладнення умов польоту, складна ситуація, аварійна ситуація, катастрофічна ситуація [1].

Надзвичайно висока швидкоплинність розвитку особливої ситуації (ОС) потребує миттєвого втручання в ситуацію для прийняття рішень, спрямованих на забезпечення керованості та стійкості ЛА. Усе це потребує пошуку більш ефективних методів запобігання розвитку ОС у польоті.

Одним з таких напрямів може стати розвиток системних методів реконфігурації керуючих поверхонь для відновлення керованості та стійкості ЛА в умовах раптового виникнення ОС.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У реальному польоті на ЛА, крім керувальних сил і моментів, що залежать від переміщення органів керування і їх станів, завжди діють випадкові збурення, зумовлені різними чинниками. До них належать випадкові складові сил і моментів рухомої установки, а також аеродинамічні сили і моменти, що з'являються внаслідок турбулентності атмосфери, порушення первісної аеродинамічної поверхні апарата чи відмов і пошкоджень у системі керування польотом.

Так, у праці [2] розглянуто чинники, що викликають втрату живучості ЛА у процесі їх льотної експлуатації, а також запропоновано методи та моделі реконфігурації керуючих органів для забезпечення виконання поставленого завдання ЛА в умовах виникнення ОС у польоті.

Дослідження [3–7] показують, що для відновлення живучості ЛА в ОС можна використовувати кілька способів. З появою раптових пошкоджень аеродинамічної поверхні ЛА, всіляких обривів у приводах кермових поверхонь або їх заклиненні, у разі відмови одного з двигунів силової установки ЛА досить ефективною може бути реконфігурація керування ЛА.

У катастрофічних ситуаціях, що передують зіткненню ЛА з перешкодою, можна було б уникнути важких наслідків, якби екіпаж мав можливість ефективно і майже миттєво змінити динамічні властивості керування польотом. Цього можна досягти, застосувавши активні методи керування польотом з одночасною його реконфігурацією стосовно ситуації, що розвивається, у польоті.

У працях [8–10] досліджувалися питання комплексного використання структурної, часової (для парирування збоїв) та версійної надмірності (для парирування прояву дефектів проектування програмних засобів), побудови та оцінювання бортових систем обробки інформації при кратних відмовах, а також відмовах, що виникають при повторних обчисленнях (парних відмовах).

У праці [11] наведено методики кількісної оцінки показників живучості технічних систем різної складності, а також способи забезпечення даної властивості систем.

### Постановка задачі

Розроблення узагальненого функціоналу ефективності, який системно враховує реконфігурацію керуючих поверхонь, а також сумарні витрати на контроль, діагностування, прогнозування, керування під час виникнення ОС у польоті.

### Розв'язання поставленої задачі

У загальному вигляді мету відновлення керованості та стійкості польоту ЛА в умовах виникнення ОС сформулюємо таким чином: забезпечення заданого рівня безпеки польотів й ефективного використання системи автоматичного керування (САК) у разі виникнення особливої ситуації в польоті. Відповідно до цього визначення, оптимальність алгоритму керування ЛА характеризується векторним критерієм:

$$\Phi E_{\text{САК}} = \{C_{\Sigma}(t), K_n(t), W(t)\},$$

де  $\Phi E_{\text{САК}}$  — функціональна ефективність САК для забезпечення реконфігурації керування ЛА в умовах виникнення ОС;  $C_{\Sigma}$  — сумарні витрати на контроль, діагностування, прогнозування, керування під час виникнення ОС у польоті;  $K_n$  — коефіцієнт, що характеризує надійність САК ЛА у процесі експлуатації;  $W(t)$  — параметр, який визначає ступінь ефективності збереження керованості та стійкості ЛА під час використання різних моделей реконфігурації в умовах виникнення ОС у польоті.

Розглянемо процес керування режимами роботи ЛА, який виконується під впливом стохастичних зовнішніх збурень та внутрішніх деградуючих процесів.

Технічний стан (ТС) ЛА опишемо випадковим вектором  $s(t) \in S$  кінцевого фазового простору  $S = \{0, \dots, 1\}$ , а зміни його структури в часі — випадковою послідовністю  $s(t_1), s(t_2), \dots, s(t_n)$ , де  $t_1, t_2, \dots, t_n$  — дискретні моменти часу.

Позначимо  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  — вектор керування несущими поверхнями ЛА, а також режимами роботи двигуна, тоді динаміку керованого процесу опишемо рівнянням:

$$s(t_{n+1}) = f(s(t_n), u(t_n)),$$

а правило вибору керування для забезпечення ефективного функціонування ЛА представимо у вигляді:

$$u(t_n) = \varphi(s(t_n), u(t_{n-1})), \quad (1)$$

де  $\{\varphi\}$  — множина типових стратегій реконфігурації ЛА в умовах виникнення ОС у польоті.

Послідовність цілеспрямованих дій  $\sigma = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$  визначає стратегію керування у просторі часу  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ , а сукупність типових стратегій керування утворює простір стратегій  $\Sigma = \{\sigma\}$ , тоді програма керування ЛА визначається трійкою [12; 13]:

$$\text{РПК}_{\text{ЛА}} := \langle U, \sigma, t \rangle,$$

де  $\text{РПК}_{\text{ЛА}}$  — реконфігурована програма керування ЛА (керуючими поверхнями, двигунами і т.п.), що забезпечує відновлення керованості та стійкості ЛА в польоті в умовах ОС;  $U$  — простір типових керуючих дій або впливів;  $t$  — послідовність моментів керуючих впливів і задана для них стратегія керування —  $\sigma$ .

Аналіз формули (1) показує, що алгоритм керування являє собою типову керуючу програму, яка реалізує той або інший метод керування, сформований у САК ЛА.

В теорії керування й діагностики ЛА знайшли широке застосування три основних методи: програмний, керування зі зворотним зв'язком, адаптивний з використанням інтелектуальних технологій.

Програмне керування й діагностування будуватиметься відповідно до заданої програми дій, незалежно від реакцій об'єкта й зовнішнього середовища. Для цього має бути повністю визначено математичну модель об'єкта керування, відомі характеристики зовнішнього середовища (умови експлуатації), чітко задані критерії оптимізації програми, що під час експлуатації ЛА не завжди можливо.

Під час керування з використанням принципу зворотного зв'язку програма керування ЛА є гнучкою, вона формується залежно від поточного технічного стану зовнішнього обводу ЛА, а також технічного стану його функціональних систем. Однак при цьому вважаємо, що математична модель ЛА та характеристики зовнішнього середовища повністю відомі.

Адаптивне керування ЛА та його системами з використанням інтелектуальних технологій використовується для «неточно» заданого об'єкта керування, у разі невідомих характеристик зовнішніх збурень та внутрішніх деградуючих процесів у його системах.

Для реального процесу льотної експлуатації ЛА в умовах виникнення ОС у польоті більшою мірою характерна третя інформаційна ситуація, коли модель об'єкта керування змінюється в процесі розвитку ОС.

Тому найбільш доцільним є застосування методу адаптивного керування з використанням інтелектуальних технологій. Особливістю реконфігурованого керування ЛА з використанням інтелектуальних технологій є:

– керування ЛА в кожний момент часу формується шляхом корекції попередніх керуючих дій на основі поточної діагностичної інформації (класифікації зміни стану зовнішнього обводу ЛА, а також класифікації функціонального стану його функціональних систем), що надходить по каналах зворотного зв'язку;

– адаптивне керування з використанням інтелектуальних технологій є неперервним процесом і здійснюється на нескінченному інтервалі часу виникнення ОС у польоті. Тільки за цих умов гарантується досягнення кінцевих цілей з високою ймовірністю;

– стратегії керування в загальному випадку не можуть бути стаціонарними, а залежать від зміни ТС зовнішнього обводу ЛА, стану його двигунів, а також функціональних систем.

Правила вибору стратегії реконфігурації керування підбираються у ході реалізації процесу класифікації ТС ЛА у польоті, тобто після визначення його зміни, обирається та чи інша типова стратегія керування.

Відповідно до загальної мети керування ЛА, виразимо цільові вимоги до показника функціональної ефективності САК в умовах виникнення ОС у польоті  $\Phi E_{\text{САК}} = \{C_{\Sigma}(t), K_{\Gamma}(t), W(t)\}$  за допомогою предикантів:

$$\Theta_{K_{\Gamma}} = \{K_{\Gamma}(t_n) \geq \hat{K}_{\Gamma}\};$$

$$\Theta_W = \{W(t_n) \geq \hat{W}\}; \quad (2)$$

$$\Theta_C = \{C_{\Sigma}(t_n)/t_n \leq (1-a_n)C_{\Sigma}(t_{n-1})/t_{n-1}\}.$$

де  $0 < a_n < 1$ .

Систему (2) наведемо в такому компактному вигляді:

$$\Theta = \Theta_{K_{\Gamma}} \Theta_W \Theta_C,$$

де  $\chi_n = \begin{cases} 1, & \Theta(t_n) \\ 0, & \bar{\Theta}(t_n) \end{cases}$  — індикатор істинності предиканта (2).

Оцінний функціонал, який характеризує значення ефективності функціонування САК ЛА в умовах виникнення ОС у польоті, який залежить від обраної стратегії керування зовнішніми ке-

руючими поверхнями ЛА, режимами роботи двигунів ( $\sigma = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$ ), представимо у вигляді:

$$R_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \chi_k.$$

Функціонал оцінки ефективності функціонування  $R_n$  є згорткою векторного критерію  $\Phi E_{\text{САК}} = \{C_{\Sigma}, K_{\Gamma}, W\}$ , який характеризує техніко-економічну ефективність функціонування ЛА.

Стратегію керування  $\sigma_{opt}$  будемо називати оптимальною, якщо вона забезпечує збереження керованості та стійкості при неперервному процесі розвитку ОС у польоті:

$$\rho = \sup_{\sigma \in \Sigma} \lim_{n \rightarrow \infty} R_n(\sigma).$$

Запропонований критерій існує внаслідок обмеженості величини  $0 \leq R_n \leq 1$ , яка залежить від зміни аеродинамічного стану зовнішнього обводу ЛА, функціонального стану його систем, впливу зовнішніх збурень.

## Висновок

Запропонований узагальнений функціонал ефективності, який системно враховує функціональну ефективність САК для забезпечення реконфігурації керуючих поверхонь, сумарні витрати на контроль, діагностування, прогнозування, керування під час виникнення ОС у польоті, а також оцінити можливість відновлення керованості та стійкості ЛА в умовах ОС у польоті.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Нормы лётной годности гражданских самолётов СССР (НЛГС - 3)*. Межведомственная комиссия по нормам лётной годности гражданских самолётов и вертолётов СССР. — 3-е издание. — 1984. — 464 с.
2. *Казак В. М.* Системні методи відновлення живучості літальних апаратів в особливих ситуаціях у польоті : монографія / В. М. Казак. — К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2010. — 284 с.
3. *Кривцов В. С.* Живучесть авиационных силовых установок: учебник / В. С. Кривцов, А. И. Рыженко; Национальный аэрокосмический ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный ин-т». — Х. : ХАИ, 2004. — 660 с.
4. *Авраменко В. Н.* Вопросы анализа живучести энергообъединений / В. Н. Авраменко. — К.: Ин-т энергодинамики НАНУ, 1997. — 45 с.
5. *Адаптивный регулятор для подавления флаттера крыльев при неизмеряемых возмущениях и немоделируемых динамиках // Системы автоматического управления и техническая кибернетика.* — М.: ВИНТИ, 1992. — № 3. — С. 17–25.

6. *Адаптивные системы управления самолетов* : Обзор. — М. : ОНТИ ЦАГИ, 1975. — № 479. — С. 41.

7. *Бруссард Р.* Применение рассчитанных заранее законов управления в реконфигурируемой системе управления полетом / Р. Бруссард, Д. Д. Мердер, Н. Хальо, А. К. Каглайан // *Аэрокосмическая техника*. — 1989. — № 2. — С. 33–42.

8. *Харченко В. С.* Верификация программного обеспечения / В. С. Харченко, В. В. Скляр, А. А. Гордеев. — Харьков : НАКУ «ХАИ», 2006. — 132 с.

9. *Харченко В. С.* Событийные модели дублированных систем с версионно-временной избыточностью при кратных и парных дефектах программно-аппаратных средств / В. С. Харченко, О. В. Шу-

рыгин // *Радиоэлектроника і інформатика*. — 2003. — № 1 (22). — С. 65–69.

10. *Черкесов Г. Н.* Надёжность программно-аппаратных комплексов / Г. Н. Черкесов. — СПб. : Питер, 2004. — 472 с.

11. *Стекольников Ю. И.* Живучесть систем / Ю. И. Стекольников. — СПб. : Политехника, 2002. — 155 с.

12. *Казак В. Н.* Модель системы совместного оценивания и управления высокоскоростными и интенсивно маневрирующими летательными аппаратами / В. Н. Казак // *Вісн. КМУЦА*. — 2000. — № 1–2. — С. 268–276.

13. *Казак В. Н.* Управление летательным аппаратом, получившим повреждение в полете / В. Н. Казак // *Вісн. КМУЦА*. — 2000. — № 3–4. — С. 85–89.

Стаття надійшла до редакції 16.02.2012.