УДК 004.722

С.М. НЕДІЛЬКО

Державна льотна академія України, Кіровоград, Україна

ПОНЯТІЙНИЙ АПАРАТ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

Запропоновано понятійний апарат теорії функціональної стійкості для автоматизованої системи управління повітряним рухом, дано визначення та математичну формалізацію функціональної стійкості, визначено необхідні та достатні умови, показники та критерії функціональної стійкості. Визначено принципові відмінності від існуючого понятійного апарату функціональної стійкості складних технічних систем. Доведено недоцільність застосування для автоматизованих систем управління повітряним рухом існуючого теоретичного підходу оцінки запасу та межі функціональної стійкості динамічних систем.

Ключові слова: *функціональна стійкість, автоматизована система управління повітряним рухом.*

Вступ

В сучасних умовах глобальною вимогою при розвитку і використанні авіації є безпека польотів. Одним з важливих напрямків забезпечення цієї вимоги є автоматизація як польоту повітряного судна, його підготовки на землі, так і управління повітряним рухом. На сьогоднішній день виконання повітряних перевезень не можливе без єдиної автоматизованої системи управління повітряним рухом. За даними ICAO з 2007 до 2010 р. складність управління повітряним рухом збільшилася на 7 – 10% [1]. З іншого боку, дослідження показали, що в комплектуючих пристроях АСУПР України в середньому за рік експлуатації відпрацьовується від 5% до 25% ресурсних показників, а моральне старіння, за той же період, становить до 35%. Тому постійно ведуться роботи з модернізації автоматизованої системи управління повітряним рухом. Аналіз програми розвитку і модернізації АСУПР в Україні [2] дозволив виявити позитивну тенденцію, спрямовану на використання сучасних пристроїв і технологій.

Дослідження існуючих науково-обґрунтованих підходів підвищення ефективності складних технічних систем, до яких повною мірою відноситься й АСУПР дозволили зробити висновок про формування, за останні роки, нового пріоритетного підходу, пов'язаного із забезпеченням системі властивості функціональної стійкості.

Постановка проблеми

Функціональна стійкість складної технічної системи поєднує властивості надійності (безвідмовності), відмовостійкості і живучості. Функціональна стійкість розглядається, як властивість системи успішно завершити завдання при регламентованому числі змін в стані самої системи, тобто зберегти її працездатність після прояву припустимого числа відмов і зовнішніх збурювань [3]. Реалізація функціональної стійкості досягається застосуванням у складній технічній системі різних уже існуючих видів надмірності (структурної, часової, інформаційної, функціональної, навантажувальної та ін.) шляхом перерозподілу ресурсів з метою парирування наслідків позаштатних ситуацій.

Разом з тим, нечисленні роботи у галузі забезпечення функціональної стійкості складних технічних систем не дають змоги виробити єдині підходи та започаткувати теоретичні основи забезпечення функціональної стійкості для АСУПР України. Проблема полягає у відсутності стандартизованого понятійного апарату функціональної стійкості щодо предметної галузі АСУПР.

Аналіз публікацій. Професор Машков О.А., який вперше ввів поняття функціональної стійкості для динамічної системи, визначає функціональну стійкість «як властивість системи, що полягає в здатності виконувати хоча б установлений мінімальний об'єм своїх функцій при відмовах в інформаційній, обчислювальній та енергетичній частинах системи, а також при зовнішніх впливах, які передбачені умовами експлуатації» [3]. Таке визначення саме по собі не враховує численні відмінності АСУПР від класичних динамічних систем і тому не може бути застосованим у якості основи для розробки понятійного апарату функціональної стійкості АСУПР.

Більш близьким можна вважати підхід, запропонований у роботах професора Барабаша О.В., у яких висвітлено теорію побудови функціонально-стійких розподілених автоматизованих систем управління, при цьому формалізується і доводиться принципова відмінність функціональної стійкості від стійкості функціонування складної розподіленої інформаційної системи [4]. Проте даний підхід базується лише на оцінках зв'язності графів мережі, що надто обмежує можливість його застосування для забезпечення функціональної стійкості АСУПР.

Є також і інші підходи щодо забезпечення функціональної стійкості для складних систем. Так у роботах професора Кравченка Ю.В. пропонується оригінальний підхід щодо визначення та забезпечення функціональної стійкості для навігаційних систем спеціального призначення [5], заснований на вирішенні оптимізаційної задачі з застосуванням матроїдних структур. Проте, такий підхід є вузькоспеціалізованим і не в змозі охопити усі аспекти функціонування АСУПР.

Отже, проблема формування понятійного апарату функціональної стійкості є актуальною і потребує розробки власного підходу щодо її вирішення.

Метою статті є формування понятійного апарату функціональної стійкості АСУПР.

Основна частина

Дамо визначення основним поняттям та термінам функціональної стійкості АСУПР.

Функціональна стійкість автоматизованої системи управління повітряним рухом – це її властивість перебувати в стані працездатності, тобто виконувати необхідні функції протягом заданого інтервалу часу або наробітки в умовах відмов складових частин через зовнішні і внутрішні фактори. Показники функціональної стійкості характеризують результат її забезпечення шляхом перерозподілу існуючої надмірності або ресурсів у позаштатних ситуаціях [6, 7].

Принципово те, що на етапі проектування не повинна вводитися додаткова надмірність, а парирування наслідків позаштатних ситуацій здійснюється перерозподілом уже існуючих ресурсів. Проблема полягає у виявленні вже наявної надмірності та формуванні сигналів у потрібний момент на її перерозподіл. У цьому є основна відмінність задачі забезпечення функціональної стійкості від задачі побудови структурно надмірних систем. Крім цього, при забезпеченні функціональної стійкості АСУПР необхідно визначити раціональне співвідношення між функціональною стійкістю елементів системи і ступенем надмірності її структури.

Опишемо АСУПР через простір параметрів $A = \langle V, D, F \rangle$, де V – множина абстрактних елементів АСУПР, D – множина абстрактних зв'язків між елементами, F – множина функцій абстрактних елементів і зв'язків. Тоді параметр α характеризує конкретний стан системи, причому $\alpha = \langle v, d, f \rangle$, де підмножина $v \subseteq V$, $|v| \le |V|$, підмножина $d \subseteq D$, $|d| \le |D|$, а підмножина $f \subseteq F$, $|f| \le |F|$.

Нехай,

$$\Delta v = v^+ \cap v^-, \quad \Delta d = d^+ \cap d^-, \quad \Delta f = f^+ \cap f^-,$$

де v^+, d^+, f^+ – максимальні за потужністю підмножини відповідно абстрактних елементів, зв'язків між елементами і функцій елементів АСУПР $|v^+| = |V|$, $|d^+| = |D|$, $|f^+| = |F|$; v^-, d^-, f^- – мінімальні за потужністю підмножини відповідно абстрактних елементів, зв'язків між елементами й функцій елементів АСУПР $|v^-| < |V|$, $|d^-| < |D|$, $|f^-| < |F|$; $\Delta v, \Delta d, \Delta f$ – формально описують всі види надмірності, наприклад, стосовно елементів, зв'язків і функцій.

Тоді математична формалізація наукової проблеми і протиріч має вигляд, представлений на рис. 1.

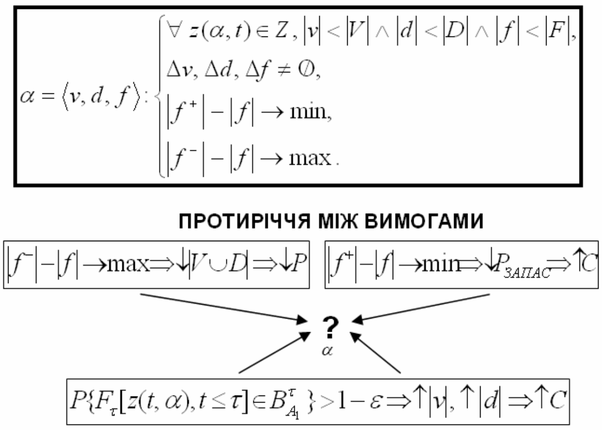

Рис. 1. Математична формалізація проблеми і протиріч щодо забезпечення функціональної стійкості АСУПР

Необхідна і достатня умова функціональної стійкості АСУПР полягає в існуванні такого складу елементів і зв'язків між ними, при якому система продовжувала б виконувати хоча б мінімально необхідні функції, а також мала б достатню надмірність для парирування наслідків позаштатних ситуацій:

$$\forall \alpha = \langle v, d, f \rangle, v \subseteq V, d \subseteq D, f \subseteq F \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \begin{cases} |v| \le |v^-|, \Delta v = v^+ \cap v^- \ne \varnothing \\ |d| \le |d^-|, \Delta d = d^+ \cap d^- \ne \varnothing \\ |f| \le |f^-|, \Delta f = f^+ \cap f^- \ne \varnothing \end{cases}. \qquad (1)$$

Дана умова має принципову відмінність від існуючих підходів теорії функціональної стійкості. Так, наприклад, в роботі [4] необхідна й достатня умова функціональної стійкості розподіленої інформаційної системи визначена в справності всіх елементів системи та наявності альтернативних маршрутів передачі інформації.

Ознаки функціональної стійкості. В технічній кібернетиці, а саме, в теорії автоматичного управління Ляпуновим А.М. і його учнями розроблена класична теорія стійкості для динамічних систем. За допомогою даної теорії можна оцінити стійкість, не вирішуючи систему диференціальних рівнянь, які є математичною моделлю об'єкту. Використовуються прості ознаки, умови і критерії стійкості, розроблені Найквістом Х., Гурвіцом А., Вишнеградським І.А., Поповим Р. та ін. За аналогією із класичною теорією стійкості пропонується оцінювати функціональну стійкість за параметрами моделі АСУПР

$$\alpha = \langle v, d, f \rangle, \ v \subseteq V, \ d \subseteq D, \ f \subseteq F \ .$$

Наявність достатньої надмірності для парирування наслідків внутрішніх і зовнішніх збурювань (позаштатних ситуацій) для системи, що продовжує функціонувати навіть із деяким погіршенням (у припустимих межах) своїх характеристик, а також факту формування ефективного відновлюючого управління (оптимального розподілу надмірності) **є** ознакою функціональної стійкості АСУПР

$$\alpha = \langle v, d, f \rangle \Leftarrow \begin{cases} \forall z(\alpha, t) \in Z, |v| < |V| \wedge |d| < |D| \wedge |f| < |F|, \\ v \subseteq V, d \subseteq D, f \subseteq F, \\ \Delta f \neq \emptyset \Leftarrow \Delta v \neq \emptyset, \Delta d \neq \emptyset, \\ \left|f^{+}\right| - |f| \to \min, \\ \left|f^{-}\right| - |f| \to \max. \end{cases} \qquad (2)$$

Показники функціональної стійкості. В якості показників функціональної стійкості АСУПР доцільно вибрати сімейство $P(F_\tau)$, що визначає ймовірність збереження деякої множини функціональних властивостей $F_\tau = F_\tau\{z(t,\alpha),\ t \le \tau\}$, $t, \tau \in I,\ \alpha \in A$:

$$P(F_\tau) = P\{F_\tau[z(t,\alpha),\ t \le \tau] \in B^{\tau}_{A_I}\}, \qquad (3)$$

де $P(F_\tau)$ − множина імовірнісних показників функціональної стійкості АСУПР.

Критерій функціональної стійкості. Виконання умови (4) є критерієм забезпечення системі властивості функціональної стійкості

$$P\{F_\tau[z(\alpha,t),\ t \le \tau] \in B^{\tau}_{A_I}\} > 1 - \varepsilon, \qquad (4)$$

де $P\{F_\tau[z(t,\alpha),\ t \le \tau] \in B^{\tau}_{A_I}\}$ − множина показників функціональної стійкості; $F_\tau = F_\tau[z(\alpha,t), t \le \tau] \in B^{\tau}_{A_I}$ − однопараметричне сімейство дійсних функціоналів; $z(\alpha, t)$ – внутрішній стан системи, що є елементом фазового простору Z; α − параметр системи, $\alpha \in A$, де A − простір параметрів; t − поточний час, $t \in I$, де I – сукупність розглянутих моментів часу; τ − інтервал часу, на якому оцінюється функціональна стійкість; $B^{\tau}_{A_I}$ − множина значень всіх функцій з B, розглянутих у точці τ; $0 \le \varepsilon \le 1$ – деяке число.

Цей критерій вимагає, щоб деяка властивість АСУПР зберігалася в тому або іншому імовірнісному смислі на заздалегідь обраному інтервалі часу.

Поняття областей стійкості. Дослідження стійкості відноситься до задач аналізу систем. Аналіз стійкості прийнято вважати завершеним, якщо на питання про те, чи зберігає система деяку властивість процесу функціонування за певних умов, отримана однозначна бінарна відповідь. Досить часто для практичних цілей такої відповіді недостатньо, і необхідні ще деякі кількісні характеристики, що відносяться до стійкості. Так, при асимптотичній стійкості звичайно цікавляться розмірами максимальної області в просторі початкових станів, у якій ще справедливо [4]

$$\lim_{t \to \infty} \rho\left[z\left(z_0, t\right), z\left(z'_0, t\right)\right] = 0. \qquad (5)$$

Дана область називається областю притяжіння рішення $z(z_0, t)$ або областю асимптотичної стійкості. Для практичної стохастичної стійкості важливо знати ймовірність, що знаходиться в лівій частині нерівності (4). Іноді цікавляться тим, при яких значеннях параметрів, що не збурюють, зберігається стійкість у тому або іншому смислі. Множину таких значень називають *областю стійкості* [4].

Досить часто задачу про знаходження зазначених кількісних оцінок можна сформулювати так – побудувати таку область Ω у множині деяких параметрів системи α^*, що якщо $\alpha^* \in \Omega$, то система залишається стійкою в смислі того або іншого визначення. Якщо параметри α^* відмінні (вірніше, незалежні) від параметрів α, то, такі області називаються областями стійкості. В деяких випадках розглядають множину параметрів α^*, частково або повністю співпадаючих (залежних) з α, як, наприклад, у випадку області асимптотичної стійкості.

Побудова зазначених областей обов'язкова насамперед для задач параметричного синтезу систем, оскільки при синтезі необхідно, по можливості, вибирати значення параметрів системи таким чином, щоб вони лежали в побудованих областях. Крім того, побудова області Ω обов'язкова для задач аналізу. Так, знаючи область асимптотичної стійкості, можна зробити висновок про наявність практичної стійкості.

В теорії динамічних систем і, особливо, при проектуванні конкретних систем можливі випадки, коли одне поняття стійкості використається для того, щоб зробити висновок про наявність стійкості в іншому смислі. Це пояснюється тим, що поки методи аналізу стійкості розвинені недостатньо і не для всіх визначень, що використовуються на практиці.

Так як області Ω, не обов'язково є областями стійкості, будемо називати їх для стислості Ω-областями [4]. Отже якщо $\alpha^* \in \Omega$, то або система стійка в смислі якого-небудь визначення (α^* – незбурювані параметри), або система зберігає деяку істотну властивість, властивої стійкості (якщо α_* хоча б частково співпадає з незбурюваними параметрами). Відзначимо тепер, що, власне кажучи, другий випадок можна звести до першого. Для простоти розглянемо випадок часткового збігу α^* з α, а не випадок їхньої залежності.

Нехай $\alpha - \alpha^*$ − параметри, що входять в α, але не є вхідними в α^* Тоді зазначене збереження властивості функціонування системи при $\alpha^* \in \Omega$ є не що інше, як стійкість у деякому смислі при фіксованому параметрі α^* і збуреному параметрі $\alpha - \alpha^*$. В окремому випадку (при $\alpha = \alpha^*$) всі параметри системи виявляються фіксованими. Це лише означає, що сімейство Λ складається з однієї одноточечної множини $\{\alpha\}$. Звичайно, оскільки змінилися збурювані параметри системи, то нове визначення стійкості, взагалі кажучи, не збігається з колишнім. В силу зробленого висновку можна вважати, що параметри α^* відрізняються від α. Ω-області прийнято шукати за допомогою чисельних методів. При цьому для кожного значення параметрів α^* повинна здійснюватися перевірка системи на стійкість. Така перевірка може здійснюватися за допомогою будь-якого методу аналізу стійкості.

В сучасних умовах для різних систем і різних визначень розроблено досить багато методів аналізу стійкості. До основних з них можна віднести: методи Ляпунова, Найквіста, Попова, Вишнеградського, Гурвіца, Михайлова та ін. [8]. В сучасній теорії стійкості розроблені критерії та ознаки, за допомогою яких можна визначити факт стійкості системи. При рішенні задач структурного та параметричного синтезу також широко використовується поняття стійкості.

При цьому, крім установлення факту стійкості, визначається запас стійкості відповідно до конкретної ознаки, а також області стійкості у фазовому просторі параметрів системи. Однак аналіз різних понять стійкості та методів визначення стійкості показав, що класична теорія стійкості оперує в основному з динамічними системами, які описуються системою диференціальних рівнянь у різних модифікаціях: лінійні, нелінійні, цифрові, стохастичні, адаптивні, оптимальні та інші системи. При цьому проблема визначення стійкості складних організаційних систем, до класу яких відноситься АСУПР, на сьогоднішній день залишається відкритою. Тому актуальною науковою задачею є розробка визначення стійкості функціонування (функціональної стійкості) АСУПР, розробка ознак і критеріїв функціональної стійкості даного класу систем, розробка понять запасу й областей функціональної стійкості (рис. 2).

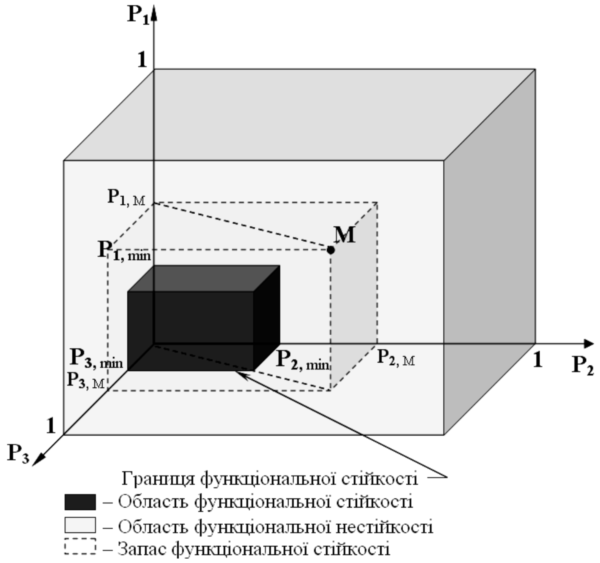

Рис. 2. Область, границя, запас функціональної стійкості АСУПР

Границя та запас функціональної стійкості. Для автоматизованої системи управління повітряним рухом існуючі підходи не прийнятні у зв'язку з корінною відмінністю принципу дії, що, як відомо, лежить в основі математичної моделі системи. Тому границя і запас функціональної стійкості, відповідно, визначені виразами:

$$P\{F_\tau[z(\alpha, t), t \le \tau] \in B^\tau_{A_1}\} = P_{min}\{F_{\tau,min}[z(\alpha, t), t \le \tau] \in B^\tau_{A_1}\}; \quad (6)$$

$$P_{ЗАПАС} = 1 - P\{F_\tau[z(\alpha, t), t \le \tau] \in B^\tau_{A_1}\}. \quad (7)$$

Таким чином, визначено область, границю та запас функціональної стійкості АСУПР.

Висновки

На основі аналізу основних функцій автоматизованої системи управління повітряним рухом, розроблені та математично формалізовані: необхідна і достатня умови функціональної стійкості системи; ознаки функціональної стійкості; показники і критерії функціональної стійкості АСУПР. Визначено принципові відмінності від існуючого понятійного апарату функціональної стійкості складних технічних систем. Для кількісної оцінки функціональної стійкості АСУПР вперше були визначені поняття границі та запасу функціональної стійкості, які характеризують максимально можливе число парируваних відмов у системі. Доведено недоцільність застосування для АСУПР існуючого теоретичного підходу оцінки запасу та границі функціональної стійкості динамічних систем. Запропоновано кількісний похід оцінки функціональної стійкості. Встановлено, що переваги даного підходу полягають в тому, що можна оцінити функціональну стійкість поточної системи за ймовірністю виконання заданих функції протягом певного інтервалу часу. На основі цих оцінок можна давати рекомендації з нарощування структури або висувати обгрунтовані вимоги до структури проектованих автоматизованих систем управління повітряним рухом.

Література

1. Чередніченко Ю.А. Аналіз факторів дестабілізації функціонування аеронавігаційної системи / Ю.А. Чередніченко // Проблеми інформатизації та управління: зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2003. – Вип. 8. – С. 3-9.

2. Чередніченко Ю.А. Напрямки розвитку аеронавігаційної системи України / Ю.А. Чередніченко // Проблеми підвищення ефективності інфраструктури: зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2002. – Вип. 8. – С. 3-5.

3. Артюшин Л.М. Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам / Л.М. Артюшин, О.А. Машков. – К.: КВВАИУ, 1991. – 89 с.

4. Барабаш О.В. Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем / О.В. Барабаш. – К.: НАОУ, 2004. – 226 с.

5. Кравченко Ю.В. Применение метода последовательного увеличения ранга k-однородного матроида в задаче синтеза структуры псевдоспутниковой радионавигационной системы / Ю.В. Кравченко // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К., 2008. – № 2 (2). – С. 19-22.

6. Неділько С.М. Актуальність забезпечення функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом / С.М. Неділько // Сучасні інформаційні технології в управлінні та професійній підготовці операторів складних систем: матеріали V Міжн. НПК, 27-28 жовтня 2010 р. – Кіровоград: ДЛАУ, 2010. – С. 3-6.

7. Неділько С.М. Функціональна стійкість автоматизованої системи управління повітряним рухом / С.М. Неділько // Системи навігації, управління та зв'язку: зб. наук. пр. – К.: ЦНДІ НіУ, 2011. – Вип. 2 (18). – С. 37-40.

8. Теорія автоматичного керування / Л.М. Артюшин, О.А. Машков, Б.В. Дурняк, М.С. Сівов. – Львів : Вид-во УАД, 2004. – 272 с.

Надійшла до редакції 27.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. В. Барабаш, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

ПОНЯТИЙНЫЙ АППАРАТ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

С.Н. Неделько

Предложен понятийный аппарат теории функциональной устойчивости автоматизированной системы управления воздушным движением, дано определение и сделана математическая формализация функциональной устойчивости, определены необходимые и достаточные условия, показатели и критерии функциональной устойчивости. Определены принципиальные отличия от существующего понятийного аппарата функциональной стойкости сложных технических систем. Доказана нецелесообразность применения для автоматизированных систем управления воздушным движением существующего теоретического подхода оценки запаса и границы функциональной стойкости динамических систем.

Ключевые слова: функциональная устойчивость, автоматизированная система управления воздушным движением.

THE FUNCTIONAL STABILITY CONCEPTS OF AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEM

S.M. Nedilko

The functional stability concepts for the theory of the air traffic control system is offered, determinations and mathematical formalization of functional stability is done, necessary and sufficient terms, indexes and criteria of functional stability are certain. Of principle differences are certain from the existent concept vehicle of functional firmness of the difficult technical systems. Pointlessness of application is well-proven for automated control the system by air motion of existent theoretical approach of estimation of supply and functional firmness of the dynamic systems.

Key words: functional stability, air traffic control system.

Неділько Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, професор, ректор Державної льотної академії України, Кіровоград, Україна.