

УДК 358.4:355.42

О.В. Барабаш¹, О.Б. Котов², Р.В. Хращевський²¹ Національний авіаційний університет, Київ² Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ ПЛАНУВАННЯ РОЗПОДІЛУ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

На основі аналізу теоретичних основ адаптації систем управління сформовані принципи адаптивної системи планування розподілу повітряного простору, де за прийняття рішення відповідає людина.

Ключові слова: адаптація, система планування, модифікація.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді.

Розглядаючи процес прийняття рішень як послідовність двох взаємозалежних, але в той же час самостійних стадій – розробки рішення і його реалізації – необхідно відзначити відповідно до цього дві модифікації управлінського рішення: теоретично знайденого й практично реалізованого. Ступінь адаптивності прийнятого рішення до практично реалізованого, в даний момент, визначається рівнем підготовленості керівника, що приймає рішення в системі планування [1]. Залежність прийнятого рішення від знань одного керівника, коли необхідно врахувати безліч факторів не є прийнятним, оскільки використання обмеженого ресурсу на реалізацію прийнятого рішення буде напряму залежати від ступеня ефективності прийнятого рішення. Вирішення зазначеної проблеми лежить у площині формування адаптивної системи планування застосування ресурсу, яка в свою чергу може бути сформована за умови визначення основних принципів її побудови.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Значний внесок у дослідження зазначеного питання зробили такі вчені як У.Р. Ешбі, М. Вінер, С. Бір, Е.П. Голубков, В.Н. Фомін та багато інших. Зазначені вчені, в основному, досліджували питання адаптивності складних технічних систем, а адаптивність системи планування де за прийняття рішення відповідає людина, є не достатньо вивчені.

Метою даної статті є проведення аналізу теоретичних основ адаптації систем управління та формування на їх основі принципів адаптивної системи планування розподілу повітряного простору.

Основна частина

Формування принципів адаптації системи планування. Для формування принципів побудови адаптивної системи планування визначимося з основними положеннями і теоретичними напрацюваннями попередників [2 – 9]. Традиційна система планування вимагає знання математичної моделі об'єкту та параметрів моделі [4]. На

практиці часто важко забезпечити досить точний математичний опис об'єкту управління і точне знання всіх необхідних величин; більше того, характеристики об'єкту в процесі функціонування можуть значно змінюватися. У зв'язку із цим досить привабливим є шлях побудови систем управління, що не вимагають повного апріорного знання об'єкту управління й умов його функціонування. Система управління повинна автоматично відшукувати потрібний закон управління за допомогою аналізу поведінки об'єкту при поточному керуванні. Будемо називати системи управління (планування) із зазначеними властивостями *адаптивними*.

Неповне знання об'єкту управління й умов його функціонування означає, що відома лише його належність деякому класу. Позначимо через Ξ цей клас. Невизначеність умов функціонування виражається в неповному знанні можливого зовнішнього впливу на угруповання сил, а сам об'єкт управління (система планування), точніше його математична модель, визначається з точністю до деяких параметрів. У цьому випадку клас Ξ – прямий добуток двох множин: множини в просторі параметрів системи планування і множини можливих зовнішніх впливів на об'єкт управління через угруповання сил.

В даному випадку передбачається мета управління (МУ), яка може бути досить відмінною від функціоналу, що підлягає мінімізації або максимізації. Розглянемо випадок, коли МУ формулюється у вигляді нерівностей, що зв'язують змінні системи в кожний момент часу. Завдання полягає в побудові регулятора, реалізація впливу якого на систему планування забезпечить при будь-яких умовах функціонування виконання відповідних нерівностей, тобто мети управління. Об'єкт і умови функціонування повинні належати класу Ξ . Такий регулятор назвемо адаптивним у класі Ξ . Саму систему назвемо *адаптивною в цьому класі*. Час досягнення мети управління назвемо *часом адаптації*.

З наведеного визначення адаптивної системи слідує, що вона має здатність «приспосовуватися» до зміни параметрів об'єкту та умов його функціонування, якщо тільки вони залишаються в класі Ξ .

Дійсно, якщо через інтервали часу, що перевищують час адаптації, відбуваються зазначені зміни, то щораз адаптивний регулятор буде знаходити потрібний закон управління, при якому виконується мета управління. Відзначимо, що будь-який регулятор, що забезпечує стійкість замкнутої системи, адаптивний у деякому класі об'єктів для сформульованої мети управління. Сформулюємо основні положення адаптивної системи й адаптивного регулятора для випадку дискретної зміни часу.

а) *Позначення й термінологія.* Припустимо, що час t дискретний: $t = 0, 1, 2, \dots$. Множину елементів z будемо позначати через $\{z\}$, а індивідуальні елементи цієї множини відзначати індексами: $z, z^{(1)}, z', z'', z_0, z_1$ і т.п. Нехай $z_0, z_1, \dots, z_t, \dots$ – деяка послідовність елементів множини $\{z\}$. Упорядковані набори відповідних елементів позначаються так ($0 \leq s \leq t$):

$$z_s^t = [z_s, \dots, z_t], \quad z_s^\infty = [z_{s+1}, \dots].$$

Отже, $z_0^0 = z_0$. Символ z_s^t з $s > t$ означає порожню множину.

Завдання адаптивної системи припускає завдання деяких множин і деяких співвідношень. А саме, передбачаються в якості даних наступні чотири множини, елементи яких називаються так:

$$\{x\}, x - \text{стан}, \quad \{\sigma\}, \sigma - \text{сенсор}, \\ \{u\}, u - \text{управління}, \quad \{\xi\}, \xi - \text{варіант}. \quad (1)$$

Всі ці множини є підмножинами евклідових просторів: $\{x\} \subset \mathbb{R}^{n_1}$, $\{\sigma\} \subset \mathbb{R}^{n_2}$, $\{u\} \subset \mathbb{R}^{n_3}$, $\{\xi\} \subset \mathbb{R}^{n_4}$.

Тоді $x = \text{col}(\hat{x}^{(1)}, \dots, \hat{x}^{(n_1)})$, $\sigma = \text{col}(\hat{\sigma}^{(1)}, \dots, \hat{\sigma}^{(n_2)})$
 $u = \text{col}(\hat{u}^{(1)}, \dots, \hat{u}^{(n_3)})$, $\xi = \text{col}(\hat{\xi}^{(1)}, \dots, \hat{\xi}^{(n_4)})$ – вектори відповідних розмірностей; назви компонентів векторів σ, u, ξ – наступні: $\hat{\sigma}^{(j)}$ – сенсори, $\hat{u}^{(j)}$ – управління, $\hat{\xi}^{(j)}$ – змінні параметри. У цьому випадку σ, u називаються також вектором сенсорів (або вектором сенсором) і вектором управління (або векторним управлінням).

Пояснимо зміст всіх введених величин. Стан x – вектор змінних, що повністю описують стан розглянутої системи у фіксований момент часу. Зазвичай система складається з об'єкта управління й регулятора, а вектор x описує їхній стан. Якщо розглядається система, що функціонує в деякому змінному середовищі, то x – стан системи планування і середовища. Сенсори – джерела інформації про об'єкт впливу та умови обстановки. В число сенсорів може входити час t . Управління – це те, що безпосередньо впливає на зміну стану системи. Варіант – це набір тих величин, незмінних у часі, від яких залежить система. Зазвичай ξ – набір параметрів об'єкта управління та умов його функціонування. В набір параметрів об'єкта управління може включатися й набір непередбачуваних випадків; тоді $\xi = [\xi', \omega]$ – пари елементів ξ' і ω , з яких ξ' – вектор реальних фізичних параметрів об'єкта управління, виділених тому, що їхні чисельні значення невідомі, а ω – абстрактний параметр, що характеризує випадок. Таким чином, $\{\omega\} = \Omega$ – множина

«елементарних подій», що фігурує в аксіоматиці теорії ймовірностей.

«Реалізація» перешкоди (як зовнішнього впливу на об'єкт управління) $v_t(\omega)$ означає, що розглядається конкретний елемент ω . Отже, варіант ξ – це елемент абстрактної множини, що включає в себе всі невідомі параметри регулятора. Потенційно варіант ξ може приймати різні значення.

б) *Еволюційне й сенсорне рівняння, ціль управління, регулятор.* Формальне завдання адаптивної системи управління припускає завдання декількох рівнянь, з них перші два наступні:

$$\sigma_t = S(x_0^t, x_0^{t-1}, t, \xi); \quad (2)$$

$$x_{t+1} = X(x_0^t, u_0^t, t, \xi). \quad (3)$$

Рівняння (2) описує сенсорне управління, а (3) – еволюційне рівняння. Запис (2) означає, що кожному набору $x_0, \dots, x_t, u_0, \dots, u_{t-1}, t, \xi$ зпівставлений елемент $\sigma_t \in \{\sigma\}$, що є значенням сенсора в момент t . Аналогічний зміст має (3). Сенсорне рівняння (2) описує роботу органів управління розвідки та інших органів управління, що надають інформацію про противника та умови обстановки. Еволюційне рівняння описує зміну стану системи в часі, за умови завдання початкового стану x_0 , варіанту ξ і послідовності управляючих сигналів $u_0^\infty = [u_0, u_1, \dots]$. Із (3) витікає, що x_{t+1} залежить лише від x_j, u_j при $j \leq t$. Іноді праві частини (2), (3) залежать тільки від x_t, u_{t-1} і x_t, u_t відповідно:

$$\sigma_t = \tilde{S}(x_t, u_{t-1}, t, \xi), \quad (4)$$

$$x_{t+1} = \tilde{X}(x_t, u_t, t, \xi). \quad (5)$$

Часто рівняння (4), (5) супроводжуються деякими умовами, разом з якими вони записуються у вигляді (2), (3). Для подальшого розгляду включимо початкове значення x_0 у варіант ξ , тобто $\tilde{\xi} = [\xi, x_0]$, $\{\tilde{\xi}\} = \{\tilde{\xi}\} \times \{x\}$, а «новий» варіант $\tilde{\xi}$ позначимо знову через ξ . Таку операцію будемо називати розширенням варіанту. Тоді x_t, σ_t визначаються з (2), (3) через ξ і u_0^∞ . У подальшому необхідно знайти закони управління відповідно до визначених вимог (тобто правила визначення u_t для всіх $t \geq 0$). Вимоги ці будемо називати *метою управління*. Управління u_t у момент часу t повинне виражатися лише через сенсор у момент часу t . У традиційній теорії управління варіант ξ вважається відомим, u_t може залежати і від ξ . Отже, закон управління повинен мати вигляд

$$u_t = \psi^0(\sigma_t, \xi), \quad (6)$$

де $\psi^0(\sigma_t, \xi)$ – деяка функція своїх аргументів.

Рівняння (2), (3), (6) замкнуті: для заданого ξ (а також і для x_0) послідовно визначаються σ_t, u_t, x_t в усі моменти часу. Рівняння (6) будемо називати *рівнянням регулятора* (не адаптивного).

Цілі управління можуть бути досить різноманітними. У теорії оптимального управління мета управління формулюється за допомогою деякого функціоналу, що підлягає мінімізації $J = J(x_0^\infty, u_0^\infty)$, а (6) – управлін-

ня, для якого цей мінімум реалізується. У багатьох випадках мета управління визначається нерівністю

$$Q_t(x_0^t, u_0^t, \xi) \leq 0 \quad (7)$$

і вказівкою, для яких моментів часу t воно повинне бути виконане. В (7) Q_t – дійсна функція своїх аргументів. Нерівність (7) називається цільовою умовою, а функція Q_t – цільовою функцією. Індекс t вказує момент часу, до якого відноситься цільова умова. Якщо (7) виконана в момент t , то говорять, що в момент t виконана цільова умова. В ідеальному випадку МУ полягає у виконанні (7) для всіх t . Іноді МУ ставиться не для всіх t ; цей випадок зводиться до розглянутого, якщо покласти $Q_t = -1$ для «зайвих» t . Випадок, коли мета управління визначається декількома нерівностями $Q_t^{(i)} \geq 0$, зводиться до розглянутого, якщо покласти $Q_t = -\min Q_t^{(i)}$.

Нехай (6) – регулятор, що забезпечує виконання цільової умови (7) для всіх $t \geq 0$. Оскільки Q_t в (7) і праві частини в (2), (3) залежать від ξ , то природньо, що права частина (6) також залежить від ξ . У традиційній теорії управління вважається відомим все, що потрібно. Тому залежність правої частини (6) від ξ не викликає незручностей.

в) *Адаптивна система, адаптивний регулятор.* Теорію адаптивних систем цікавлять ситуації, коли варіант ξ невідомий і отже, коли, регулятором (6) скористатися неможливо. У цих випадках управління u_t формується по-іншому. Вводиться множина $\{\tau\} \subset \mathbb{R}^N$, елемент τ якого називається вектором параметрів підлаштування. Управління u_t визначається співвідношеннями ($t \geq 0$)

$$u_t = \mathcal{U}(\sigma_t, \tau_t), \quad (8)$$

$$\tau_{t+1} = \mathcal{J}(\sigma_t, \sigma_{t+1}, \tau_t). \quad (9)$$

Тут \mathcal{U} , \mathcal{J} – функції відповідно на $\{\sigma\}$ ($\{\tau\}$ і $\{\sigma\} \subset \{\tau\}$ зі значеннями в $\{u\}$ і в $\{\tau\}$). При заданих τ_0 і ξ , а також x_0 з (2), (3), (8), (9) послідовно визначаються σ_t , u_t , x_t , τ_t для всіх $t \geq 0$. Підкреслимо, що праві частини (8), (9) не залежать від ξ .

Пояснимо формули (8), (9). У багатьох випадках, аналізуючи функцію $\mathcal{U}^0(\sigma, \xi)$ в (6), що визначає закон управління, для якого виконана МУ, вдається точно або приблизно представити її у вигляді

$$\mathcal{U}^0(\sigma, \xi) = \mathcal{U}[\sigma, \tau(\xi)], \quad (10)$$

де $\tau(\xi) \in \mathbb{R}^N$ – N -мірний вектор відносно невеликої розмірності N , а $\mathcal{U}[\sigma, \tau]$ – деяка функція на $\{\sigma\} \in \mathbb{R}^N$. Компоненти вектора $\tau(\xi)$ будемо називати істотними параметрами. У цьому випадку в якості $\{\tau\}$ варто взяти $\{\tau\} = \mathbb{R}^N$, а функцію $\mathcal{U}[\sigma, \tau]$ варто взяти як праву частину в (8). Закон (9) визначення параметрів підлаштування, бажано вибрати так, щоб $\tau_t \rightarrow \tau(\xi)$ при $t \rightarrow \infty$. Тоді при більших t праві частини (6) і (8) будуть близькими і, внаслідок безперервності мета управління буде виконана.

Отже, формули (8), (9) можна розглядати як формули відшукування потрібного закону управління в класі законів управління $\mathcal{U}(\sigma, \tau_\infty)$, $\tau_\infty \in \{\tau\}$.

Визначення 1. Нехай $\Xi \subset \{\xi\}$ – деяка множина варіантів і $T_0 = \{\tau_0\} \subset \{\tau\}$ – деяка множина початкових значень τ_0 вектора параметрів підлаштування. Система (2), (3), (8), (9) називається адаптивною в класі Ξ відносно цільової умови (7), якщо для будь-якого $\xi \in \Xi$ і для будь-якого $\tau_0 \in T_0$ знайдеться такий момент $t_\mu = t_\mu(\xi, \tau_0)$, що для всіх $t \geq t_\mu$ виконано (7). Найменше із чисел t_μ , що задовольняють цій умові, називається *часом адаптації*. Якщо $\tau_t = \text{const}$ при всіх досить великих t , то адаптивну систему називають системою із стабілізуючим законом управління. Рівняння (8), (9) адаптивної системи називаються *управліннями адаптивного регулятора (адаптивним регулятором)*.

г) *Зауваження.* Нескінченний проміжок часу при формуванні системи адаптивного планування замінимо кінцевим, але достатньо великим. Якщо через інтервали часу, що перевищують час адаптації, відбуваються зміни варіанту (що не виходять із класу адаптації), то адаптивний регулятор буде знаходити закон управління, що забезпечує виконання МУ. У цьому сенсі адаптивна система дійсно «приспосовується» до зміни всіх умов, що характеризується варіантом $\xi \in \Xi$.

Зміну параметрів $\alpha_j(t)$ у часі можна описати в багатьох випадках формулою

$$\alpha_j(t) = \alpha_j^{(1)} \varphi^{(1)}(t) + \dots + \alpha_j^{(N)} \varphi^{(N)}(t),$$

де $\varphi^{(h)}(t)$ – фіксовані функції, $\alpha_j^{(h)}$ – змінні параметри, частина компонентів варіанту ξ . Тому, задачі зі змінними параметрами зазначеного типу знаходяться в розглянутому класі задач.

Розглянувши теоретичні основи формування адаптивних систем, сформуємо на їх основі принципи, на яких повинна базуватися система планування для забезпечення її адаптивності.

Принцип приналежності завдань до класу адаптації [5]. Адаптація, згідно У.Р. Ешбі, визначає відношення між множиною змін зовнішнього середовища і метою, на досягнення якої спрямована діяльність системи. Отже, зміна відношення між множиною показників впливу зовнішнього середовища на процес планування і метою системи планування вимагає нової організації діяльності системи. Наявність зв'язку множини показників, що характеризує зовнішнє середовище і показників, які характеризують систему планування свідчить про приналежність завдань системи планування до класу адаптивних.

Принцип цілеспрямованої поведінки системи [5, 6]. Цілеспрямована дія, відповідно до положень Н. Вінера, вимагає від'ємного зворотного зв'язку: якщо мета повинна бути досягнута, то в будь-який момент часу необхідні сигнали від неї, щоб скорегувати поведінку системи [6].

Цілеспрямоване поведіння може мати місце й у випадку відсутності зворотного зв'язку, тобто коли донесення про хід операції не змінюють діяльності системи планування [6]. Однак у такому випадку система вже не буде адаптивною.

З огляду на те, що цілеспрямованість дій системи пов'язана з наявністю зворотних зв'язків, необхідно вказати на встановлення умов їх застосування, тобто необхідно встановити співрозмірність реакції та відхилення. Відсутність співрозмірності веде до необгрунтованого використання обмежених ресурсів або до їх невикористання взагалі, що, в остаточному підсумку, може привести до неможливості виконання системою своїх функцій.

Таким чином, відсутність зворотних зв'язків або співрозмірності між відхиленням і реакцією на нього є перешкодою для організованої діяльності.

Принцип передбачення [4 – 6]. Це здатність, що безпосередньо пов'язана із цілеспрямованістю діяльності системи та її обмеженнями, являється внутрішньою організацією самої системи. Якщо організація системи така, що вона здатна прогнозувати ступінь досягнення мети залежно від змін умов обстановки, то вона зможе вчасно адаптуватися й створити «нову організацію». У протилежному випадку, організація діяльності системи не зможе бути адаптивною.

Принцип збереження свободи вибору рішень. Принцип збереження свободи вибору рішень, або принцип неостаточних рішень, є одним з фундаментальних у системах адаптації [7 – 9].

Відповідно до цього принципу свободи вибору забезпечується тим, що в кожний наступний момент прийняття рішень кількість доступних рішень із кількості кращих рішень, прийнятих у заданий момент часу і близьких до оптимального, повинно бути більше одиниці [4]. Це дозволить уникнути потреби в «аварійних» рішеннях при виникненні ситуації, яку не можна було передбачати в момент часу коли вибиралося тільки одне оптимальне рішення. Відсутність простору рішень і прогнозуючих моделей приводить до необхідності вироблення «аварійних» рішень, які далекі від оптимальних і ефективність яких залежить від мистецтва керівника приймати рішення. Необхідність прийняття рішень, як правило в обмежений термін, вимагає від керівника великого практичного досвіду і навичок у швидкому пошуку рішень у таких ситуаціях.

Принцип зовнішніх доповнень. Сформульований С. Біром [7] цей принцип в математиці одержав назву регуляризації рішень.

Принцип зовнішніх доповнень був запропонований С. Біром у якості способу подолання наслідку теореми неповноти К. Геделя.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА

О.В. Барабаш, А.Б. Котов, Р.В. Хращевский

На основе анализа теоретических основ адаптации систем управления сформированы принципы адаптивной системы планирования распределения воздушного пространства, где за принятие решения отвечает человек.

Ключевые слова: адаптация, система планирования, модификация.

PRINCIPLES OF ADAPTIVE PLANNING DISTRIBUTION OF AIRSPACE

O.V. Barabash, O.B. Kotov, R.V. Khrashchevskiy

On the basis of the theoretical foundations of the adaptation of principles of adaptive management formed the system of planning the distribution of the airspace where the responsibility for decision-making people.

Keywords: adaptation, planning system, the modification.

Стосовно до системи управління геделевський підхід означає, що контур зворотнього зв'язку стабілізує всі змінні, крім зовнішнього доповнення норми, відносно якої здійснюється стабілізація.

Для оцінки норми необхідно створити додатковий контур зворотнього зв'язку для порівняння з відповідною нормою. Реалізація принципу зовнішніх доповнень зробила б можливим здійснення контролю процесу прийняття рішень з точки зору об'єктивності вироблюваного рішення й виключення помилок, які можуть бути допущені в процесі формування рішень на кожному з його етапів. На підставі даного принципу може бути сформований дієвий механізм контролю підсистеми планування.

Висновки

На основі проведеного аналізу теоретичних основ адаптації систем управління та степені їх реалізації в існуючій системі планування [11] сформовані принципи адаптивної системи планування розподілу повітряного простору де за прийняття рішення відповідає людина.

Список літератури

1. Хращевський Р.В. Аналіз системи планування застосування збройних сил США та НАТО / Р.В. Хращевський // Збірник наукових праць НА ДПСУ. Хмельницький: НА ДПСУ, 2009. – № 14.1. – С. 23 – 29.
2. Гэлбрэйт Дж., Новое индустриальное общество / Дж.Гэлбрэйт. – М.:Прогресс, 1969. – 320 с.
3. Bellman R. Stratification and control of large systems with applications to chess and checkers / R. Bellman. – Inform. Sci., 1, 1, Dec. (1968). – 424 p.
4. Фомин В.Н. Адаптивное управление динамическими объектами / В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков, В.А. Якубович. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
5. Эшби У.Р. Принципы самоорганизации // У.Р. Эшби. – М.: Мир, 1966. – 343 с.
6. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в живом и машине / Н. Винер. – М.: Наука, 1983. – 343 с.
7. Бир С. На пути к кибернетическому предпринятию / С. Бир. – М.: Мир, 1966. – 489 с.
8. Ивахненко А.Г. Принятие решения на основе самоорганизации / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Зайцев, В.Д. Дмитриев. – М.: Сов. радио, 1976. – 280 с.
9. Габор Д. Перспективы планирования / Д. Габор // Автоматика. – 1972. – № 2. – С. 16-22.

Надійшла до редколегії 7.02.2012

Рецензент: д-р техн. наук проф. Ю.В. Кравченко, Національний університет оборони України, Київ.