УДК 629.782.05

А.В. ГУСИНІН

Національний технічний університет України «КПІ», Україна

ДИФЕРЕНЦІАЛЬНО-ІГРОВИЙ ПІДХІД ДО СИНТЕЗУ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ БАГАТОРЕЖИМНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Запропоновано диференціально-ігровий підхід до синтезу гарантовано-адаптивних алгоритмів керування рухом багаторежимних літальних апаратів в умовах дії збурень. Підхід засновано на застосуванні математичного апарату диференціальних ігор, гарантує досягнення термінальних умов при впливі невідомих збурень, зводить проблему синтезу адаптивного алгоритму керування до розв'язання кінцевої системи рівнянь відносно його вільних параметрів та параметрів збурень, не потребує чисельного інтегрування диференціальних рівнянь траєкторного руху літальних апаратів та допускає аналітичне розв'язання проблеми. Алгоритми керування, що отримають за запропонованим підходом, володіють властивостями адаптації до дії збурень та забезпечують гарантію реалізації процесу керування при найгіршому сполученні дії факторів обмежених збурень.

Ключові слова: *багаторежимні літальні апарати, моделювання, диференціальна гра, термінальне керування, диференціальні перетворення.*

Вступ

Рух багатьох літальних апаратів, таких як ракети-носії, авіаційно-космічні системи, аеростатичні літальні апарати та ін. є багаторежимним. Це пов'язано з умовами їх експлуатації. Так, процес керованого виведення на орбіту ракети-носія або орбітального ступеня авіаційно-космічної системи характеризується різними режимами роботи двигунної установки ступенів і стрибкоподібною зміною маси в моменти відділення ступенів та скидання головного обтічника. Крім того, на кожному етапі виведення необхідно враховувати наявність різних обмежень на теплове навантаження та аеродинамічні перевантаження, дію збурень навколишнього середовища, тощо. Процес керування рухом аеростатичного літального апарата характеризується різними режимами керування балонетами (впуск та випуск повітря) та газовими клапанами, вектором тяги двигунів та аеродинамічними органами управління, практично стрибкоподібною зміною маси апарату під час скидання баласту. Іншою особливістю руху аеростатичних літальних апаратів є наявність обмежень на параметри руху в процесі виконання зльоту та посадки.

Багаторежимність руху літальних апаратів призводить до необхідності побудови їх системи керування з найбільш повним урахуванням особливостей експлуатації. Оптимізація багаторежимного руху літального апарату дозволяє реалізувати його максимально можливі льотні характеристики, сприяє підвищенню надійності польоту внаслідок підвищення стійкості алгоритмів керування до зовнішніх збурень.

Синтез алгоритмів керування багаторежимних літальних апаратів в умовах дії збурень є складною проблемою. Високий порядок нелінійних диференціальних рівнянь просторового руху літальних апаратів, зміна в широкому діапазоні масово-інерційних характеристик ускладнюють розв'язання цієї проблеми. При цьому, звичайно відсутня апріорна інформація відносно компонентів зовнішніх збурень. В той же час, високі вимоги до термінальних параметрів при виведенні на орбіту ракет-носіїв та авіаційно-космічних систем, значна тривалість польоту літаків та аеростатичних літальних апаратів вимагають врахування впливу збурень на досягнення цілій керування.

Одним з способів розкриття невизначеності, пов'язаної з непередбаченою дією зовнішніх збурень, є застосування концепції гарантовано-адаптивного підходу до синтезу алгоритмів керування траєкторним рухом літальних апаратів. Ця концепція використовує принцип максимального гарантованого результату, тому що процес керування розглядається при найбільш несприятливих умовах, які можуть мати місце при впливі збурень.

Задача синтезу гарантованого керування у невизначених умовах впливу збурень вимагає переходу від задач оптимізації до задач двобічної оптимізації, які розглядаються в теорії диференціальних ігор [1]. В таких умовах доцільно розглядати задачу термінального керування у формі математичної моделі диференціальної гри двох гравців, дослідження якої засноване на принципі максимального гарантованого результату [2, 3]. Перший гравець формує керування літальним апаратом, а вектор збурень формується цілеспрямовано другим гравцем. Цілі управління першого та другого гравців є протилежними. Завдання першого гравця полягає у переводі літального апарату з початкового стану у задане кінцеве, при якому мінімізується критерій якості керування за умови максимізації його з боку другого гравця. Ігровий підхід гарантує досягнення термінальних умов при будь-яких допустимих реалізацій вектора збурень, так як синтез алгоритмів термінального керування орієнтований на найбільш несприятливі умови дії збурень.

В праці [4] запропонований підхід до синтезу алгоритмів термінального керування динамічних об’єктів в умовах дії збурень на основі диференціальних перетворень моделі диференціальної гри. Метод не вимагає для своєї реалізації чисельного інтегрування диференціальних рівнянь руху динамічного об’єкту, використовує математичний апарат диференціальних перетворень функцій та рівнянь [5]. При цьому, задача синтезу оптимального адаптивного алгоритму зводиться до рішення системи нелінійних рівнянь відносно його вільних параметрів.

В статті цій підхід розвинутий для синтезу гарантовано-адаптивного керування рухом багаторежимних літальних апаратів.

Диференціально-ігрова модель процесу керування багаторежимного літального апарату

Весь процес керування рухом багаторежимного літального апарату розбиваємо на задані r тимчасових інтервалів, в яких масово-інерційні параметри літального апарату і режими роботи його двигунної установки не мають стрибкоподібних змін, а всі зміни у формі заданих стрибків відбуваються на межах заданих тимчасових інтервалів

$$T_i = t_i - t_{i-1},\ \ i = \overline{1,r}\,,\ \ \sum_{i=1}^{r} T_i = T\,,$$

де T – час процесу керування.

Тоді до кожного з *r* інтервалів можна застосувати оптимізацію процесу керування у формі [6]. При цьому, результуюча траєкторія відновлюється за ділянками зі стиковкою крайових умов.

Модель диференціальної гри, що описує траєкторний рух літального апарату на кожній ділянці в умовах дії збурень, представимо у вигляді векторного диференціального рівняння:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(t, x_i, u_i, \nu_i),\ \ x_i(t_{i-1}) = x_i^0,\ \ i = \overline{1,r}\,, \quad (1)$$

де $x_i = x_i(t)$ – n -мірний вектор стану;

u_i – m -мірний вектор керування;

ν_i – ℓ -мірний вектор збурень;

f_i – неперервна і неперервно диференційована за сукупністю змінних t, x_i, u_i, ν_i вектор-функція узагальнюючої сили, $t \in (t_i - t_{i-1})$.

Спряження кінцевих (термінальних) та початкових умов ділянок процесу керування задається в формі заданих крайових умов [7, 8]:

$$\varphi_i\left[x_i(T_i), x_{i+1}^0; u_i(T_i), u_{i+1}^0; T_i\right] = 0,\ \ i = \overline{1,r}\,. \quad (2)$$

Задача першого гравця полягає в переводі динамічного об’єкту (1) із заданого початкового стану $x_i(t_0)$ в кінцеве $x_r(T)$, яке визначається в момент стану $t = T$ q-мірним $(q \le n)$ векторним рівнянням:

$$S\left[x_r(T), T\right] = 0\,. \quad (3)$$

Мета керування багаторежимним літальним апаратом полягає у такому виборі керування $u_i(t)$, яке в процесі руху літального апарату забезпечує мінімізацію функціоналу

$$I = G\left[x_r(T), T\right] + \sum_{i=1}^{r} \int_{t_0}^{T} \Phi_i\left(t, x_i, u_i, \nu_i\right) dt,$$

$$i = 1, 2, 3, ..., r \quad (4)$$

за умови максимізації його в процесі вибору вектора збурень $\nu_i(t)$ другим гравцем.

Припускаємо, що задані функції G і Φ_i мають неперервні частинні похідні за x_i, u_i, ν_i. Функції $u_i(t)$ та $\nu_i(t)$ називаються програмними стратегіями гравців. Вважаємо, що обмеження на стратегії гравців враховані в процесі вибору вигляду функціоналу (4).

Пара стратегії гравців u_i^0 та ν_i^0 називається оптимальною, якщо має місце співвідношення:

$$I(u_i^0, \nu_i) \le I(u_i^o, \nu_i^o) \le I(u_i, \nu_i^0)\,. \quad (5)$$

Необхідними умовами оптимальності стратегій u_i^0 та ν_i^0 є [3]:

$$\frac{\partial I}{\partial u_i} = 0,\quad \frac{\partial I}{\partial \nu_i} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial u_i^2} \ge 0,\quad \frac{\partial^2 I}{\partial \nu_i^2} \le 0, \quad (7)$$

а достатніми умовами – співвідношення (6) та умова (7), в якої має місце сувора нерівність. Стратегії гравців u_i^0 та ν_i^0, що задовольняють достатнім умовам, забезпечують існування сідлової точки (5) диференціальної гри (1) – (4). Процес керування траєкторним рухом будемо розглядати у межах таких математичних моделей диференціальних ігор, які задовольняють умовам (6) та (7).

З виразу (5) випливає, що довільний закон зміни вектору збурень, відмінний від оптимального ν_i^0, не погіршує якість процесу керування об'єктом, яке досягається при оптимальному керуванні u_i^0. Тому керування u_i^0 гарантує якість процесу керування не гірше оцінки (u_i^0, ν_i^0) в умовах дії довільних обмежених збурень. Враховуючі, що керування u_i^0 забезпечує отримання гарантованої оцінки якості процесу керування і адаптивність до конкретного виду дії збурень, будемо називати керування u_i^0 гарантовано-адаптивним [4].

Моделювання процесу керування багаторежимними літальними апаратами у формі диференціальної гри знімає невизначеність, що викликана дією збурень. Розкриття невизначеності досягається ціною ускладнення математичної моделі та процесу моделювання, в результаті чого, окрім оптимального керування u_i^0, необхідно визначити закон зміни вектору збурень ν_i^0, що описує максимальну протидію цілям термінального керування.

Метод синтезу гарантовано-адаптивного керування

Відомі методи синтезу ігрових алгоритмів термінального керування вимагають для своєї реалізації чисельного інтегрування диференціальних рівнянь. Аналітичні рішення диференціальної гри (1)-(4) отримані для випадку лінійних диференціальних рівнянь (1) та вибору критерію у вигляді квадратичного функціоналу [3].

Для оптимізації керування багаторежимних літальних апаратів скористаємося диференціально-ігровим підходом, запропонованим у [4], з використанням математичного апарату диференціальних перетворень [5,9]. Це дозволяє звести проблему задачі синтезу термінального керування до розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь без чисельного інтегрування або диференціювання рівнянь траєкторного руху літального апарату, що значно скорочує об'єм необхідних обчислень.

Диференціальні перетворення дозволяють замінити функції $x(t)$ неперервного аргументу t їх моделями у вигляді дискретних функцій $X(k)$ цілочислового аргументу $k = 0, 1, 2, \ldots$ згідно виразу:

$$\underline{x(t)} = X(k) = \frac{h^k}{k!}\left[\frac{d^k x(t)}{dt^k}\right]_{t=t_0}, \tag{8}$$

де $x(t)$ – оригінал, що являє собою неперервну і обмежену разом із усіма своїми похідними функцію дійсного аргументу t;

$X(k)$ – дискретна функція цілочислового аргументу k, яка називається диференціальним спектром функції $x(t)$ в точці $t = t_0$;

h – масштабна стала, яка має розмірність аргументу t;

риса знизу – символ перетворення.

Математичні моделі, що отримані на основі диференціальних перетворень (8) вихідної математичної моделі, називаються спектральними моделями. У подальшому будемо вважати, що функції часу, які описують процеси керування в задачі (1) – (4) усередині кожної ділянки руху, є аналітичними.

Синтез гарантовано-адаптивних алгоритмів керування здійснимо у два етапи.

На першому етапі виконаємо синтез ігрових оптимальних алгоритмів програмного керування $u_i^0(t)$ та максимально протидіючого збурення $\nu_i^0(t)$, які задовольняють умовам (6) та (7), у середині кожної ділянки керування в класі аналітичних функцій

$$u_i(\tau, A_i) \text{ та } \nu_i(\tau, B_i),$$

де $A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \ldots a_{iN})$ та $B_i = (b_{i1}, b_{i2}, \ldots b_{iM})$ – вектори вільних параметрів, τ - локальний часовий аргумент.

Оберемо масштабну сталу $h = T_i$ та покладемо $\tau = 0$. Застосувавши диференціальні перетворення (8) до функцій $u_i(\tau, A_i)$ та $\nu_i(\tau, B_i)$ отримуємо їх диференціальні спектри у вигляді:

$$\underline{u_i}(\tau, A_i) = U_i(k, A_i) = \frac{T_i^k}{k!}\left[\frac{d^k u_i(t_{i-1} + \tau, A_i)}{dt^k}\right]_{\tau=0}; \tag{9}$$

$$\underline{\nu_i}(\tau, A_i) = V_i(k, B_i) = \frac{T_i^k}{k!}\left[\frac{d^k \nu_i(t_{i-1} + \tau, B_i)}{dt^k}\right]_{\tau=0}. \tag{10}$$

Диференціальне рівняння (1) в області зображень на основі перетворень (8) зображується у формі спектральної моделі:

$$X_i(k+1, A_i, B_i, X_i^0) = \\ = \frac{T_i}{k+1} f_i \begin{bmatrix} T_i, X_i(k, A_i, B_i, X_i^0), \\ U_i(k, A_i), V_i(k, B_i) \end{bmatrix}; \qquad (11)$$

$$X_i(0) = X_i^0(A_{i-1}, A_{i-2}, ...A_1, B_{i-1}, B_{i-2}, ..., B_1);$$

$$X_1(0) = X_1^0 = x_0; \; i = \overline{1, r}.$$

Спектральна модель (11) має універсальний характер та може бути використана для рішення задач траєкторного руху різних багаторежимних літальних апаратів, які відрізняються як за своєю компоновкою, так й за степеню багаторежимності. Відмітимо, що оскільки диференціальні перетворення (8) є точним операційним методом, то спектральна модель (11) не має методичних похибок та потенційно дозволяє отримати точне рішення диференційного рівняння (1). Рекурентний вираз (11) дозволяє знайти диференціальний спектр $X_i(k, A_i, B_i, X_i^0)$ вектору стану $x_i(t)$ за диференціальними спектрами (9) та (10).

Скористаємося властивістю диференціальних перетворень, згідно якої алгебраїчна сума усіх дискет диференціального спектру будь-якої аналітичної функції в точці $t = t_\nu$ дорівнює нульовій дискреті диференціального спектру функції в точці $t_{\nu+1} = t_\nu + h$ або значенню оригіналу функції в тій самій точці [5]:

$$\sum_{k=0}^{\infty} X_\nu(k) = X_{\nu+1}(0) = x(t_\nu + h). \qquad (12)$$

З співвідношення (12) при $t_\nu = t_{i-1}$ та $h = T_i$ знаходимо вектор стану в кінці кожної ділянки керування:

$$x_i(T_i, A_i, B_i, x_i^0) = \\ = \sum_{k=0}^{\infty} X_i(k, A_i, B_i, X_i^0), \; i = \overline{1, r}. \qquad (13)$$

Тоді рівняння кінцевого стану усього процесу керування (3) з урахуванням виразу для спряження термінальних та початкових ділянок (2), а також виразу для вектору стану в кінці кожної ділянки (13) перетвориться до вигляду:

$$S[A_1, A_2, ..., A_r, B_1, B_2, ..., B_r] = 0. \qquad (14)$$

Дана термінальна умова у неявній формі визначає q-компонент векторів вільних параметрів A_i та B_i, $i = \overline{1, r}$ у вигляді функцій від T_i та x_i^0. Решту M+N-q компонентів векторів вільних параметрів визначаємо із умов (6) стаціонарності функціоналу (4). Представимо функціонал (4) на основі диференціальних перетворень (8) у вигляді векторів невизначених параметрів A_i та B_i:

$$I(A_1, A_2, ..., A_r, B_1, B_2, ..., B_r) = \\ = G[A_1, A_2, ..., A_r, B_1, B_2, ..., B_r] + \sum_{i=1}^{r} T_i \times \\ \times \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\Phi_i\left[T_i, X_i(k, A_i, B_i, X_i^0), U_i(k, A_i), V_i(k, B_i)\right]}{k+1}. \qquad (15)$$

Умови стаціонарності (6) функції (15) дають можливість отримати систему рівнянь для визначення решти M+N-q невідомих компонент векторів вільних параметрів $A_1, A_2, ..., A_r$ та $B_1, B_2, ..., B_r$:

$$\frac{\partial I(A_1, A_2, ...A_r, B_1, B_2, ..., B_r)}{\partial a_{ij}} = 0, \\ q+1 \le i \le N; \qquad (16)$$

$$\frac{\partial I(A_1, A_2, ...A_r, B_1, B_2, ..., B_r)}{\partial b_{ij}} = 0, \\ 1 \le j \le M. \qquad (17)$$

Розв’язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь (14), (16) та (17), у випадку їх сумісності, дозволяє знайти компоненти векторів вільних параметрів $A = (A_1, A_2, ..., A_r)$ та $B = (B_1, B_2, ..., B_r)$ програмних стратегій обох гравців у вигляді функції вектору довільного початкового стану $x_0 = x_1(t_0)$.

Після цього можуть бути перевірені достатні умови (6), (7) оптимальності стратегій гравців при суворій нерівності у виразі (7).

У випадку, коли система рівнянь (14), (16) та (17) несумісна, диференціальна гра (1) – (7) не має рішення при вибраному вигляді функцій $u(t, A)$ та $v(t, B)$ і тоді необхідно змінити вигляд функцій з вільними параметрами або розширити розмірність векторів вільних параметрів [4]. Питання сумісності даних рівнянь розглянуто в [5].

Таким чином, у результаті виконання першого етапу у неявній формі встановлюється нелінійний зв'язок програмних стратегій обох гравців $u(t, A)$ та $v(t, B)$ з вектором начального стану $x_0 = x_1(t_0)$. Ці стратегії можуть бути використані тільки у початковий момент часу t_0 і не враховують зміни стану у процесі руху. Для врахування поточного стану процесу керування необхідно синтезувати алгоритми керування та максимальної протидії збурень у формі позиційних стратегій гравців

$$u = u(x, t), \; v = v(x, t).$$

На другому етапі синтезу зробимо наступне припущення. Будемо розглядати тільки такі моделі процесу керування, у яких стратегії гравців існують та дозволяють зв'язати довільну початкову умову у межах заданої області простору стану із заданими термінальними умовами (3).

Синтез стратегій поза заданої області простору стану не розглядається.

У кожний поточний момент часу t для кожного поточного стану гри $x(t)$ із розв'язання системи рівнянь (14), (16) та (17) визначається пара стратегій гравців

$$u^{o}[t, A(T, x)] \text{ та } v^{0}[t, B(T, x)],$$

що пов'язують поточний стан гри із заданими термінальними умовами (3). Якщо організувати неперервний за часом процес обчислювання параметрів А та В стратегій гравців, то на множині рішень можна сформувати стратегії гравців на кожної ділянки руху у вигляді

$$u[t, A(T, x)] \text{ та } v[t, B(T, x)].$$

Перший гравець, який реалізує потенційну стратегію $u[t, A(T, x)]$, що безперервно визначається з системи рівнянь (14), (16) та (17), гарантує керування багаторежимним літальним апаратом з досягненням заданих термінальних умов (3) при максимальній протидії збурень, дія яких моделюється стратегією другого гравця $v[t, B(T, x)]$.

За необхідності знайти оптимальну траєкторію $x(t, A, B)$ її компоненти можуть бути визначені у вигляді відрізків рядів Тейлора або з використанням зворотних диференціальних перетворень у формі многочленів Лежандра, Чебишева, рядів Фур'є [5, 9]. При цьому, вільні параметри апроксимуючих функцій визначають з порівняння диференціальних спектрів компонент вектору стану з диференціальними спектрами апроксимуючих функцій. Рівняння зв'язку між вільними параметрами деяких апроксимуючих функцій та дискретами диференціального спектру невідомої функції часу надано в [5].

Перевагою розглянутого підходу є відсутність необхідності інтегрування диференціальних рівнянь руху динамічного об'єкту із заміною операції інтегрування обчисленнями за рекурентним виразом (11) та потенціальна можливість отримання точного рішення диференціальної гри (1) – (7) за умови точного відображення функцій часу кінцевим диференціальним спектром. Така можливість з'являється в наслідок того, що диференціальні перетворення (8) є точним операційним методом.

Висновки

Запропоновано підхід до синтезу гарантовано-адаптивних алгоритмів керування рухом багаторежимних динамічних об'єктів на основі математичного апарату диференціальної гри для випадку відсутності апріорної інформації про стохастичні характеристики дії збурень. Даний підхід формалізовано у вигляді відповідної математичної моделі. Основною перевагою запропонованого методу полягає в аналітичних перетвореннях, які дозволяють істотно зменшити об'єм обчислень для отримання рішень у числовій формі. Це дозволяє проводити безперервні обчислення програмних стратегій гравців у реальному масштабі часу та отримати керування багаторежимним динамічним об'єктом із зворотнім зв'язком, що враховує дію різних збурень.

Література

1. *Айзекс, Р. Дифференциальные игры [Текст] / Р. Айзекс. – М.: Мир, 1967. – 479 с.*
2. *Васильев, В.В. Моделирование задач оптимизации и дифференциальных игр [Текст] / В.В. Васильев, В.Л. Баранов. – К.: Наукова думка, 1989. – 294 с.*
3. *Брайсон, А. Прикладная теория оптимального управления [Текст] / А. Брайсон, Ю-Ши Хо. – М.: Мир, 1972. – 544 с.*
4. *Моделирование игровых алгоритмов терминального управления динамическими объектами [Текст] / В.Л. Баранов, О.С. Уруский, Г.Л. Баранов, Е.Ю. Комаренко // Электронное моделирование. – 1996. – Т. 18, № 2. – С. 75 – 81.*
5. *Пухов, Г.Е. Дифференциальные спектры и модели [Текст] / Г.Е. Пухов. – К.: Наукова думка, 1990. – 184 с.*
6. *Баранов, В.Л. Моделирование задач терминального управления методом дифференциальных преобразований [Текст] / В.Л. Баранов, О.С. Уруский, Г.Л. Баранов // Электронное моделирование. – 1995. – Т.17, № 2. – С. 12 – 16.*
7. *Гусынин, В.П. Моделирование процесса терминального управления многорежимными объектами на основе дифференциальных преобразований [Текст] / В.П. Гусынин, А.В. Гусынин // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI'2010): межд. науч. конф. 17-21 мая 2010 г. – Евпатория (Крым, Украина), 2010. – С. 59 – 60.*
8. *Гусінін, В.П. Оптимізація керування виведенням на орбіту багаторежимної авіаційно-космічної системи на основі диференціальних перетворень [Текст] / В.П. Гусинін, А.В. Гусинін, О.М. Тачиніна // Проблеми інформатизації та управлінння. – 2008. – №3. – С. 68 – 73.*

9. Збруцький, О.В. Диференціальні Т-перетворення в задачах автоматичного керування рухом літальних апаратів [Текст]: навч. посіб. / О.В. Збруцький, В.П. Гусинін, А.В. Гусинін. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 176 с.

Надійшла до редакції 27.12.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедри телекомунікацій О.І. Лисенко, Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем НТУУ «КПІ», Київ.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ИГРОВОЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОРЕЖИМНЫХ ЛЕТАЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.В. Гусынин

Предложен дифференциально-игровой подход к синтезу гарантированно-адаптивных алгоритмов управления движением многорежимных летательных аппаратов в условиях действия возмущений. Подход основан на использовании математического аппарата дифференциальных игр, гарантирует достижение терминальных условий при действии неизвестных возмущений, сводит проблему синтеза адаптивного алгоритма управления к решению конечной системы уравнений относительно его свободных параметров и параметров возмущений, не требует численного интегрирования дифференциальных уравнений траекторного движения летательных аппаратов и допускает аналитическое решение проблемы. Алгоритмы управления, полученные по предложенному подходу, обладают свойствами адаптации к действию возмущений и обеспечивают реализацию процесса управления при наихудшем сочетании действия факторов ограниченных возмущений.

Ключевые слова: многорежимные летательные аппараты, моделирование, дифференциальная игра, терминальное управление, дифференциальные преобразования.

DIFFERENTIAL-GAMING APPROACH TO THE CONTROL ALGORITHMS SYNTHESIS OF MULTIMODE VEHICLES

A.V. Gusynin

Differential-gaming approach to the guaranteed-adaptive algorithms of motion control of multimode vehicles at disturbances action is proposed. The approach based on mathematical apparatus of differential game, guaranteed of terminal terms achievement at unknown disturbances action, reduced the synthesis problem to the solution of finite set of equations relative to its free parameters and disturbance parameters, doesn't demand numerical integration of differential equations of trajectory vehicle motion and allows of analytical problem solution. Control algorithms, received at proposed approach, possessed by adaptation properties to the disturbance action and provided the guarantee of control process realization at the worst combination of limited disturbance factors action.

Key words: multimode vehicles, simulation, differential game, terminal control, differential transformation.

Гусинін Андрій Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри медичної кібернетики та телемедицини, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна, e-mail: gusynin@gmail.com.