УДК 62-50

Б.В. Молодецький, ад'юнкт
В.Л. Баранов, д.т.н., проф.
Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова
Національного авіаційного університету

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ ТЕРМІНАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТОМ ДРУГОГО ПОРЯДКУ

У статті розглянуто задачу термінального управління виконавчим пристроєм станції прийому інформації дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Запропоновано методику синтезу сигналу управління силовим слідкувальним приводом (ССП) при супроводженні низькоорбітальних космічних апаратів (КА).

Вступ. З розвитком цифрових систем автоматичного керування відкривається можливість покращити їх точнісні характеристики. Наочним прикладом, коли від величини допустимої похибки супроводження космічного апарата (КА) під час проведення сеансу зв'язку залежить якість отриманої корисної інформації ДЗЗ, є ССП опорно-поворотного пристрою.

Одним з основних завдань Загальнодержавних (Національних) космічних програм України є створення космічних систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) високої розрізненності. Такі системи характеризуються високою швидкістю передачі інформації по радіолінії «БОРТ-ЗЕМЛЯ» (десятки Мбіт/с) та несучою частотою корисного сигналу в діапазоні частот С та Х. Ця особливість вимагає модернізації існуючих станцій прийому інформації ДЗЗ. Вона передбачає переоснащення як радіотракту, так і системи супроводження по напрямку станцій прийому інформації. Тільки в такому випадку стане можливим надійний прийом інформації ДЗЗ високої розрізненності.

Аналіз стану задачі. Виконання завдань, які поставлені Загальнодержавними космічними програмами України, передбачає модернізацію існуючих радіотехнічних засобів. Розглядаючи космічну систему ДЗЗ високої розрізненності, а саме наземні станції прийому інформації, слід відзначити залежність допустимої похибки супроводження від діапазонів частот передачі корисної інформації. Її залежність від діаметра дзеркальної антени зображена на рис. 1. Невиконання вимог точності призведе до значних втрат корисної інформації та зниження якості знімків ДЗЗ.

У ході проведення модернізації системи супроводження за напрямком станції прийому інформації ДЗЗ високої розрізненності для низькоорбітальних КА слід врахувати такі фактори:

1) складну динаміку руху КА під час проведення сеансу зв'язку, особливо в області проходження зеніту;
2) суттєву зміну відношення сигнал/шум протягом часу проведення сеансу зв'язку.

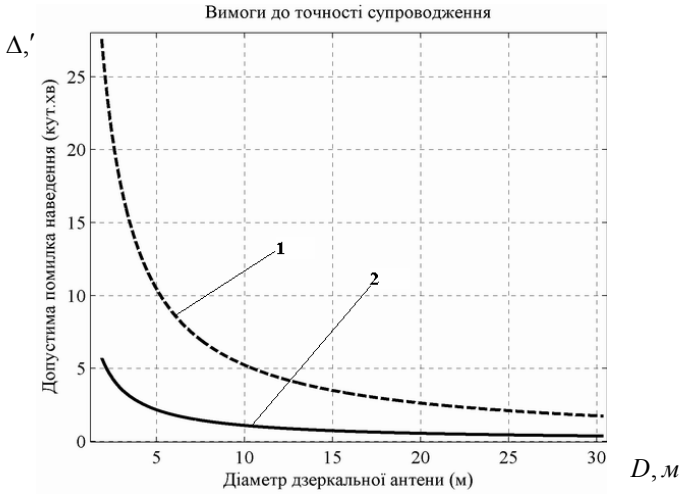

Рис. 1. Вимоги до точності супроводження КА: 1 – в С *діапазоні частот; 2 – в Х діапазоні частот*

Крім того, приступаючи до проведення модернізації ССП, доцільно врахувати необхідність інтеграції електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) у контур управління. Реалізація на їх основі цифрового регулятора дозволить покращити показники якості функціонування цифрового ССП станції прийому інформації ДЗЗ порівняно з аналоговим.

© Б.В. Молодецький, В.Л. Баранов, 2008

Аналіз останніх досліджень. Для створення на базі існуючих зразків техніки високоточних та надійних систем автоматичного керування слід використати в контурі управління ЕОМ різного типу та елементи цифрової техніки. Питанням дослідження динаміки дискретних систем з амплітудо-імпульсною модуляцією присвячені роботи професора В.І. Гостєва. В літературі [1] автором представлені питання синтезу цифрових регуляторів для довільних вхідних впливів. Завданням таких регуляторів є забезпечення оптимальної величини та якості перехідного процесу. Використаний математичний апарат z-перетворень, дозволяє отримати аналітичний вигляд необхідної передаточної функції цифрового регулятора (ЦР).

Питання управління об'єктами другого порядку з невідомими параметрами досліджуються в роботі [2]. Автором розглядається процес синтезу сигналу управління на основі допоміжних функцій переключення. Пропонуються алгоритми корекції роботи цифрового регулятора побудовані на уточненні параметрів об'єкта. Слід відмітити пропорційну залежність порядоку витрат машинного часу при збільшенні порядку об'єкта регулювання для таких алгоритмів. Це, у свою чергу, ускладнює їх практичну реалізацію.

Альтернативний математичним апаратом є математичний апарат диференціальних перетворень академіка Г.Є. Пухова. Його використання для задач термінального управління представлений в роботі [3]. В статті представлений метод синтезу сигналу термінального управління двигуном ракети носія. Можливість отримання цифрового регулятора, зручного для реалізації у вигляді програми ЕОМ, являє інтерес для використання при проведенні модернізації існуючих аналогових ССП.

Формулювання завдання досліджень. При проведенні сеансу зв'язку з КА виконується задача відпрацювання антенною системою заздалегідь розрахованих цілевказівок. Тому процес супроводження КА ДЗЗ представимо у вигляді задачі переводу антенної системи з початкової точки фазового простору $\vec{Y}_0$ у визначену кінцеву $\vec{Y}_H$ за визначений час H. Задачі в подібній постановці розв'язувались у роботах [2, 3]. Отриманий в них вигляд сигналу управління забезпечує перевід об'єкта управління із поточного положення на фазовій площині у визначене термінальне положення. Для кожного інтервалу проведемо синтез управління, яке переводить опорно-поворотний пристрій із поточного стану $\vec{Y}_0 = [y_0, \omega_0]^T$ в кінцевий $\vec{Y}_H = [y_H, \omega_H]^T$, де y – одна з кутових координат антени, ω – її швидкість, H – задана тривалість процесу управління.

Об'єктом управління ССП є двигун постійного струму з незалежним збуренням. Він описується системою диференціальних рівнянь вигляду:

$$\begin{cases} i(t) = \dfrac{1}{R} * [u(t) - Cw * \omega(t)] \\ \dfrac{d\omega(t)}{dt} = \dfrac{1}{J} * [Cm * i(t) - Mc] \\ \dfrac{dy(t)}{dt} = \omega(t) \end{cases}, \qquad (1)$$

де $u(t)$ – шуканий сигнал управління $[B]$, $Cw = k * \Phi_з \left[B * c / рад. \right]$;

k – конструктивний коефіцієнт двигуна постійного струму $\left[B * c / рад. * Вб \right]$;

$\Phi_з$ – магнітний потік збудження $[Вб]$;

R – активний опір обмоток якоря $[Ом]$;

$i(t)$ – струм якоря $[A]$;

Cm – постійна двигуна за моментом $\left[Н * м / A \right]$;

J – момент інерції, перерахований до валу двигуна $\left[кг * м^2 \right]$;

Mc – момент сухого тертя $[Н * м]$;

$y(t)$, $\omega(t)$ – кутове положення та кутова швидкість вала двигуна $[рад.]$, $\left[рад. / c \right]$.

Процес супроводження КА під час сеансу зв'язку розглядається як сукупність задач термінального управління на інтервали управління H. У такому випадку структурну схему ССП станції прийому інформації ДЗЗ можна подати у вигляді (рис. 2).

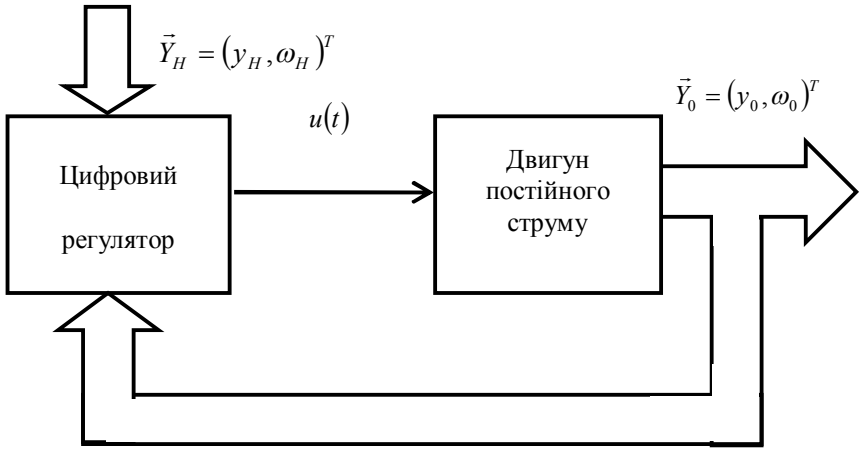

Рис. 2. Структурна схема ССП при термінальному управлінні

Задача термінального управління на інтервалі H полягає у переводі динамічного об'єкта (1) із заданого початкового стану $\vec{Y}_0 = (y_0, \omega_0)^T$ у кінцевий (термінальний) $\vec{Y}_H = (y_H, \omega_H)^T$ за допомогою сигналу управління $u(t)$ вигляду:

$$u(t) = \sum_{i=0}^{n} u_i * t^i \ . \tag{2}$$

Викладення основного матеріалу. Розглянемо методику синтезу сигналу управління $u(t)$ на інтервалі $t \in [0, H]$ виду (4), побудовану на математичному апараті диференціальних перетворень функцій і рівнянь, які запропоновані в роботах [6, 7] при

$$u(t) = u_0 + u_1 t \ . \tag{3}$$

Даний метод не вимагає числового інтегрування системи диференціальних рівнянь (1). Ця перевага досягається за рахунок використання властивостей диференціальних перетворень. Вони дозволяють провести заміну довільної функції, яка має n похідних на визначеному інтервалі $t \in [0, H]$, її моделлю у вигляді дискретної функції $X(k)$ цілочислового аргументу k. $X(k)$ має вигляд:

$$X(k) = \frac{H^k}{k!}\left[\frac{d^k x(t)}{dt^k}\right]_{t=0}, \quad k = 0, 1, 2, ..., N \ , \tag{4}$$

де H – масштабна змінна;

$x(t)$ – неперервна функція в області оригіналів;

$X(k)$ – компоненти дискретного диференціального спектра (функція $x(t)$ в області зображень).

Для визначення спектральної моделі двигуна постійного струму (ДПС), описаного системою диференціальних рівнянь (1), скористаємося властивістю похідної $Д$ в області зображень (5) [6,7]:

$$ДX(k) = \frac{k+1}{H} X(k+1) \ . \tag{5}$$
$$0 \le k \le n$$

Застосувавши диференціальні перетворення (4) та властивість (5) до виразу (1), отримаємо модель ДПС в області зображень [6]:

$$\begin{cases} I(k) = \dfrac{1}{R} * [U(k) - Cw * W(k)] \\ W(k+1) = \dfrac{H}{(k+1) * J} * [Cm * I(k) - \delta(k) * Mc], \\ Y(k+1) = \dfrac{H}{(k+1)} * W(k) \end{cases} \tag{6}$$

де

$\delta(k)=\begin{cases}1, k=0,\\ 0, k>0,\end{cases}$ – теда-функція [6].

Тоді диференційний спектр сигналу управління як функція від коефіцієнтів полінома (3) набуде вигляду:

$$\begin{aligned} &U(0)=u_0,\\ &U(1)=u_1 * H,\\ &U(k\ge 2)=0. \end{aligned} \tag{7}$$

Для визначення невідомих величин u_0 та u_1 сигналу управління $u(t)$ (3) складемо систему рівнянь. Для цього використаємо властивість суми дискрет диференціального спектра та кінцеві термінальні умови $\vec{Y}_H=(y_H,\omega_H)^T$ [6]:

$$\begin{cases}\sum\limits_{k=0}^{3}Y(k)=y_H\\ \sum\limits_{k=0}^{2}W(k)=\omega_H\end{cases}. \tag{8}$$

У системі рівнянь (8) дискрети $Y(0)$ та $W(0)$ визначаються використовуючи значення вектора поточного стану $\vec{Y}_0=(y_0,\omega_0)^T$ (9):

$$\begin{aligned} &W(0)=\omega_0\\ &Y(0)=y_0 \end{aligned}. \tag{9}$$

Дискрети $W(1)$, $W(2)$, $Y(1)$, $Y(2)$, $Y(3)$ визначаються з рекурентного виразу (6). Для об'єкта управління другого порядку представленого диференційною моделлю (6) вони набувають значення:

$$W(1)=\frac{CmH}{JR}\left[u_0-CwW(0)\right]; \tag{10}$$

$$W(2)=\frac{CmH}{2JR}\left[u_1H-CwW(1)\right]; \tag{11}$$

$$Y(1)=HW(0); \tag{12}$$

$$Y(2)=\frac{H}{2}W(1); \tag{13}$$

$$Y(3)=\frac{H}{3}W(2). \tag{14}$$

Підставивши вирази (10)–(14) в (8), отримаємо систему алгебраїчних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів u_0 та u_1 пошуканого сигналу управління $u(t)$ на інтервалі $t\in[0,H]$.

$$\begin{cases}\frac{H^2Cm}{JR}\left(\frac{1}{2}-\frac{HCmCw}{6JR}\right)u_0+\frac{H^3Cm}{6JR}u_1+H\left(1-\frac{HCmCw}{2JR}+\frac{H^2Cm^2Cw^2}{6R^2J^2}\right)\omega_0+y_0-y_H=\\ \frac{HCm}{JR}\left(1-\frac{HCmCw}{2JR}\right)u_0+\frac{H^2Cm}{2JR}u_1+\left(1-\frac{HCmCw}{JR}+\frac{H^2Cm^2Cw^2}{2R^2J^2}\right)\omega_0-\omega_H=0\end{cases} \tag{15}$$

.

Представивши сигнал управління $u(t)$ у вигляді вектора $\vec{U}=(u_0,u_1)^T$ рішення системи (15) можна записати у вигляді:

$$\vec{U}=A*\vec{Y}_H-B*\vec{Y}_0, \tag{16}$$

де вектори A та B мають вигляд:

$$A=\begin{Vmatrix}\frac{6JR}{H^2Cm} & -\frac{2JR}{HCm}\\ \frac{6HCmCw-12JR}{H^3Cm} & \frac{6JR-2HCmCw}{H^2Cm}\end{Vmatrix},$$

$$B = \begin{Vmatrix} \dfrac{6JR}{H^2 Cm} & \dfrac{4JR - HCmCw}{HCm} \\ \dfrac{6HCmCw - 12JR}{H^3 Cm} & -\dfrac{6JR - 4HCmCw}{H^2 Cm} \end{Vmatrix}.$$

На основі інформації про поточні y_0, ω_0 та кінцеві y_H, ω_H значення фазових координат за виразом (16) обчислюється сигнал управління двигуном постійного струму $u(t)$ на кожний наступний інтервал управління. Таким чином реалізується замкнутий закон термінального управління (рис. 2).

Дослідження якості функціонування запропонованої методики синтезу сигналу управління розглядалося на базі двигуна постійного струму незалежного збурення ССП станції прийому інформації ДЗЗ з параметрами $R = 0{,}3689 \ [Ом]$, $Cm = 0{,}354 \ [H * м / A]$, $Cw = 0{,}409 \ [B * c / рад.]$, $J = 0{,}0132 \ [кг * м^2]$.

На рис. 3 і 4 представлені результати роботи методики протягом трьох інтервалів управління $H = 0{,}5 * T_д = 16{,}765 \ мс$ для режиму початку сеансу зв'язку та проходження зеніту. Аналіз проведено для випадку, коли поточне положення антенної системи співпадає з розрахованою координатою КА, а швидкість антенної системи дорівнює нулю $\vec{Y}_0 = (x_{КА}, 0)^T$.

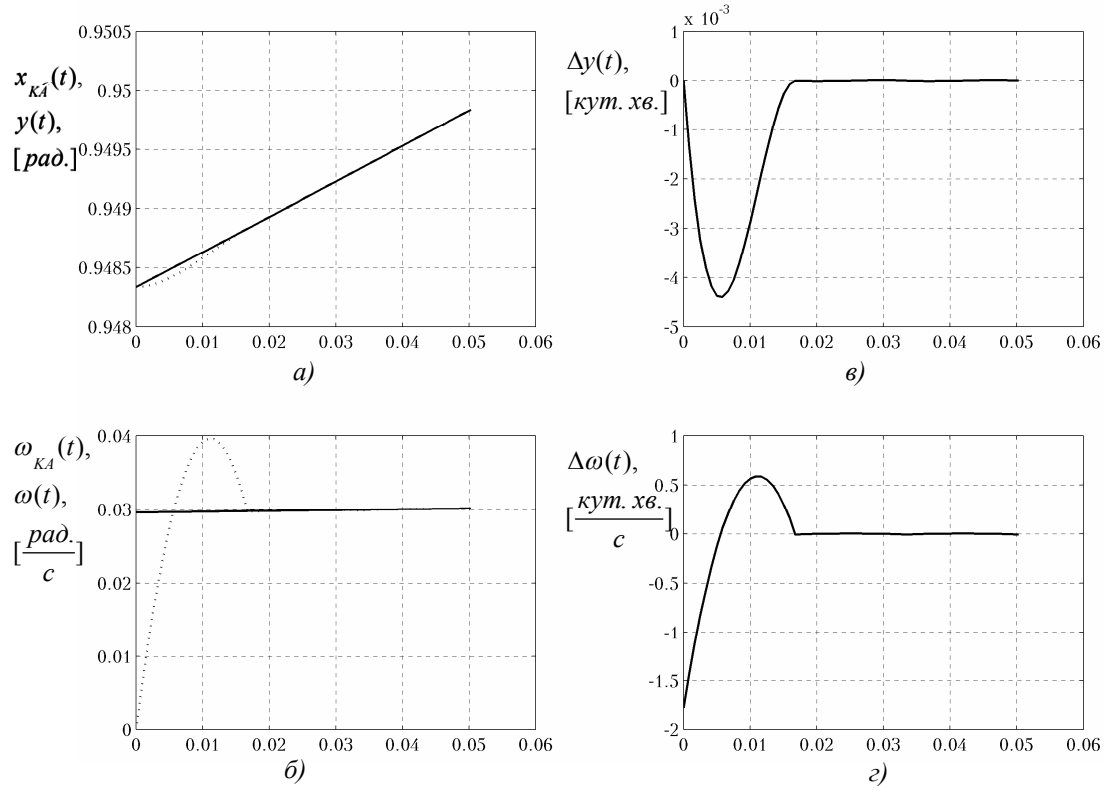

Рис. 3. Результат моделювання роботи цифрового регулятора в режимі початку сеансу зв'язку

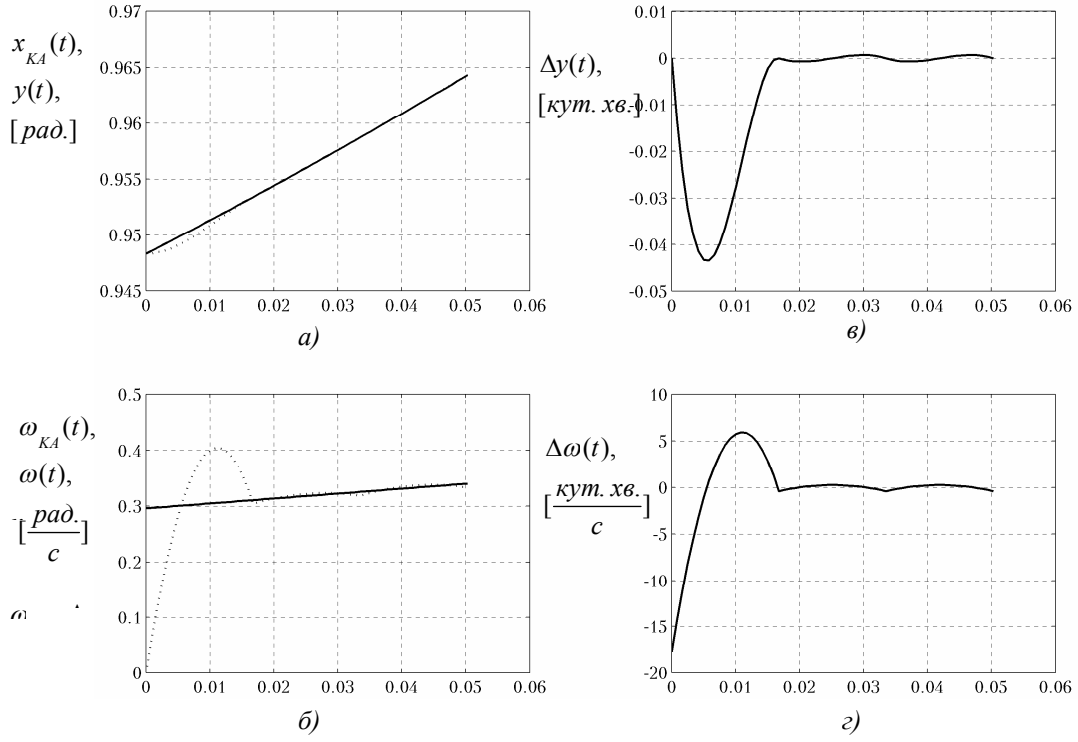

Рис. 4. Результат моделювання роботи цифрового регулятора в режимі проходження зеніту

Для режиму початку сеансу зв'язку швидкість зміни положення КА складає $0{,}03\,{}^{рад.}\!/_{с} \approx 2\,{}^{\circ}\!/_{с}$ (рис. 3, *б*). В результаті роботи запропонованої методики після завершення першого інтервалу управління H досягається нульова помилка супроводження по кутовій координаті $\Delta y(t)$ (рис. 3, *в*).

Аналізуючи дослідження якості роботи методики в режимі проходження зеніту, слід відмітити збільшення на порядок величини швидкості зміни кутового положення (рис. 4, *б*). В кінці трьох інтервалів управління H вона досягає значення $0{,}34\,{}^{рад.}\!/_{с} \approx 20\,{}^{\circ}\!/_{с}$. Для такого режиму роботи ССП сигнал управління, отриманий за допомогою запропонованої методики, забезпечує супроводження КА з похибкою $7{,}127 * 10^{-4}$ *кут. хв.* (рис. 4, *в*).

Проведена оцінка якості синтезованого сигналу управління об'єктом другого порядку свідчить про можливість використання запропонованої методики як ЦР ССП станції прийому інформації ДЗЗ високого розрізнення.

Значення величина помилки на початку управління свідчить про перевантаження двигуна. У подальшому планується провести визначення сигналу управління $u(t)$, який буде оптимізувати функціонал вигляду:

$$\Phi = \int_0^H i^2(t)dt\ . \qquad (17)$$

Вибір функціонала (17) для покращення якості управління ДПС силового слідкувального приводу станції прийому інформації ДЗЗ високої розрізненості дозволить знизити навантаження на виконавчий пристрій та енергоспоживання станції.

Висновки. У статті представлена методика синтезу замкнутого термінального управління на основі диференціальних перетворень. Її особливість полягає в тому, що розв'язок задачі синтезу термінального управління двигуном постійного струму ССП станції прийому інформації ДЗЗ зводиться до розв'язання системи алгебраїчних рівнянь. Отримано у векторній формі модель регулятора. Вона має векторний вхід $\vec{Y}_0$, $\vec{Y}_H$ і проводить управління кутовим положенням та кутовою швидкістю антенної системи протягом сеансу зв'язку з КА.

Наводиться приклад розрахунку сигналу термінального управління для двигуна постійного струму ССП станції прийому інформації ДЗЗ високого розрізнення. За результатами моделювання якості

синтезованого сигналу управління доведена можливість використання запропонованої методики в ССП станції прийому інформації ДЗЗ високого розрізнення.

Результат можна використовувати при замкненому циклі управління ССП станції прийому інформації ДЗЗ високої розрізненності від низькоорбітальних КА.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Гостев В.И.* Системы управления с цифровыми регуляторами: справочник. – К.: Техника, 1990. – 280 с.
2. *Кучеров Д.П.* Алгоритмы адаптивного терминального управления объектами второго порядка с запаздыванием // Зб. наук. пр. ЖВІРЕ. – Житомир, 2007. – Вип. 11. – С. 136–145.
3. *Уруский О.С.* Синтез замкнутых законов терминального управления на основе дифференциальных преобразований // Электронное моделирование. – 1996. – № 3. – С. 3–8.
4. *Крутько П.Д.* Управление исполнительными системами роботов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 336 с.
5. Теория автоматического управления / А.А. Воронов, Д.П. Ким, В.М. Лохин и др. – 2-е изд. – М. : Высшая школа, 1986. – 504 с.
6. *Пухов Г.Е*. Дифференциальные спектры и модели // Ин-т проблем моделирования в энергетике. – К.: Наукова думка, 1990. – 184 с.
7. Програмне та математичне забезпечення ЕОМ: диференціальні моделі військово-прикладних задач. – Ч. 1 / В.Л. Баранов, Г.Л. Баранов, Д.В. П'ясковський, С.В. Водоп'ян. – Житомир: ЖВІРЕ, 2003. – 76 с.
8. Програмне та математичне забезпечення ЕОМ: диференціальні моделі військово-прикладних задач. – Ч. 2 / В.Л. Баранов, Г.Л. Баранов, Д.В. П'ясковський, С.В. Водоп'ян. – Житомир : ЖВІРЕ, 2006. – 44 с.

МОЛОДЕЦЬКИЙ Богдан Валентинович – ад'юнкт Житомирського військового інституту ім. С.П.Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- комп'ютерне моделювання фізичних процесів;
- цифрові системи автоматичного управління.

Тел. (моб.): 8-063-654-83-14.

E-mail: BodyZ@rambler.ru

БАРАНОВ Володимир Леонідович – Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник ЦКР.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання складних динамічних систем;
- некоректні задачі;
- диференціальні перетворення.

Подано 03.11.2008

Молодецький Б.В., Баранов В.Л. Методика синтезу термінального управління об’єктом другого порядку
Молодецкий Б.В., Баранов В.Л. Методика синтеза терминального управления объектом второго порядка
Molodetsky B.V., Baranov V.L. The technique of terminal control signal of second order object

УДК 62-50

Методика синтеза терминального управления объектом второго порядка / Б.В. Молодецький, В.Л. Баранов

В статье рассмотрена задача терминального управления исполнительным устройством станции приема информации дистанционного зондирования Земли. Предложена методика синтеза сигнала управления силовым следящим приводом во время сопровождения космических апаратов.

УДК 62-50

The technique of terminal control signal of second order object / B.V. Molodetsky, V.L. Baranov

The article deal with the problem of terminal control by executive device of Earth remote sensing information reception station. It also suggests the technique of signal control servo device accompanied by low – orbiting spacecraft.