

В. Л. Баранов, Д. В. П'ясковський, С. В. Водоп'ян, Б. В. Молодецький

## МЕТОДИКА СИНТЕЗУ ТЕРМІНАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ СИЛОВИМ СЛІДКУВАЛЬНИМ ПРИВОДОМ СТАНЦІЇ ПРИЙОМУ ІНФОРМАЦІЇ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

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.** 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 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.** Аналіз систем супроводження станції прийому інформації як складової космічної системи ДЗЗ високого розрізнення виявив зростання вимог до точності супроводження космічного апарата (КА) під час проведення сеансу зв'язку. Це пов'язано з високою частотою радіоканалу «БОРТ-ЗЕМЛЯ», що приводить до звуження в розмірах ширини діаграми спрямованості приймальної антени. У такому випадку змінюється допустима помилка супроводження КА. Її залежність від діаметра дзеркальної антени зображена на рис. 1. Невиконання вимог з точності призведе до значних втрат корисної інформації а зниження якості знімків ДЗЗ.

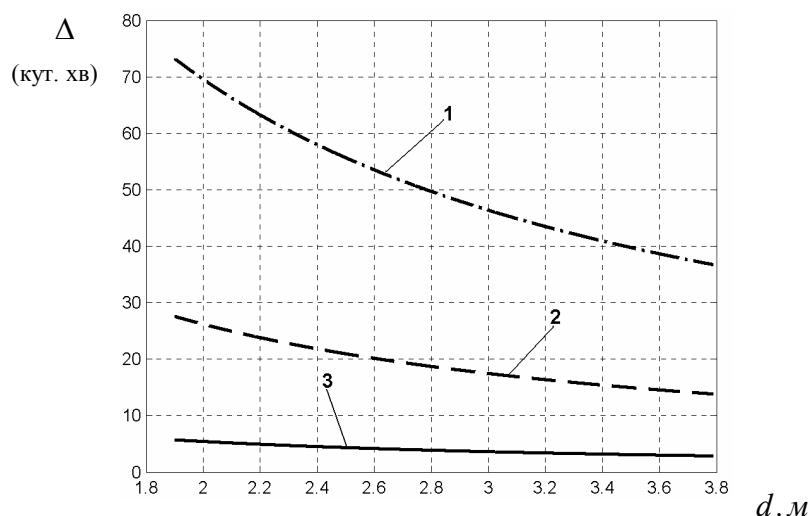


Рис. 1. Вимоги до точності супроводження КА під час сеансу зв'язку: 1 – при несучій частоті 137 МГц; 2 – при несучій частоті 1,7 ГГц; 3 – при несучій частоті 8 ГГц

У ході проведення модернізації системи супроводження за напрямком станції прийому інформації ДЗЗ високої розрізненості 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.

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.

**Аналіз останніх досліджень.** Питанням дослідження динаміки дискретних систем з амплітудо-імпульсною модуляцією присвячені роботи професора В. І. Гостева. Автором значною мірою опрацьовані питання синтезу цифрових систем, оптимальних за швидкістю та якістю перехідних процесів [1]. Моделі двигуна і цифро-аналогового перетворювача, основані на математичному апараті  $z$ -перетворень, дозволяють проводити аналіз і синтез цифрових автоматичних систем із заданими показниками точності. Але більшість робіт, що ґрунтуються на математичному апараті  $z$ -перетворень, обмежені системами з амплітудо-імпульсно модульованим сигналом управління виконавчим пристроєм. У свою чергу, підвищення потужності таких систем обмежене розвитком лінійних потужних підсилювачів.

Питання управління об'єктами другого порядку досліджуються в роботі [2]. Автором розглядається процес синтезу сигналу управління на основі допоміжних функцій переключення. Такий підхід потребує значних витрат машинного часу, що, у свою чергу, ускладнює практичну реалізацію.

Процес термінального управління розглядається в роботі [3]. У ній запропоновано метод синтезу законів термінального управління, побудований на диференціальних моделях перетворення математичної моделі задачі термінального управління. Запропонований в роботі синтез замкнутого закону управління вимагає подальшого розвитку для створення можливості застосування його в ССП станції прийому інформації ДЗЗ.

**Формулювання завдання досліджень.** Супроводження КА ДЗЗ можна розглядати як перевід антенної системи з початкової точки фазового простору  $\vec{Y}_0$  у визначену кінцеву  $\vec{Y}_H$  за певний час  $H$ . Задача у такій постановці належить до класу оптимальних систем – систем з термінальним управлінням [4]. У подібній постановці задачі розв'язувались у роботах [2, 3]. Отриманий в них вигляд сигналу управління забезпечує переведення об'єкта управління із початкового положення на фазовій площині у визначене термінальне положення. Але отримані результати не можуть бути застосовані у силовому слідкувальному приводі. Це пов'язано з необхідністю витримувати жорстко заданий часовий графік.

Як об'єкт управління ССП є двигун постійного струму з незалежним збуренням. Він описується системою диференціальних рівнянь такого вигляду:

$$\begin{cases} i(t) = \frac{1}{R}(u(t) - Cw\omega(t)), \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J}(Cmi(t) - Mc), \\ \frac{dy(t)}{dt} = \omega(t), \end{cases} \quad (1)$$

де  $u(t)$  – шуканий сигнал управління,  $Cw = k_k \Phi$ ;

$k_k$  – конструктивний коефіцієнт двигуна постійного струму;

$\Phi$  – магнітний потік збудження;

$R$  – активний опір обмоток якоря;

$i(t)$  – струм якоря;

$Cm$  – постійна двигуна за моментом;

$J$  – момент інерції, перерахований до валу двигуна;

$Mc$  – момент сухого тертя;

$y(t)$ ,  $\omega(t)$  – кутове положення та кутова швидкість валу двигуна.

Розіб'ємо сеанс зв'язку з КА на інтервали управління  $H$  та розглянемо їх як сукупність задач термінального управління. У такому випадку структурну схему ССП станції прийому інформації ДЗЗ можна подати у вигляді (рис. 2). 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:

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

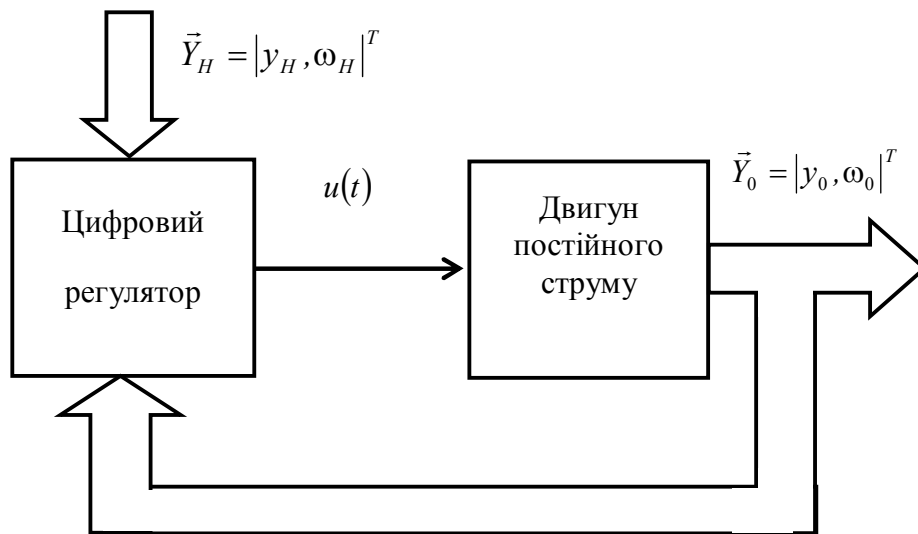


Рис. 2. Структурна схема ССП при термінальному управлінні

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо методикку синтезу сигналу управління  $u(t)$  (2) на інтервалі  $t \in [0, H]$ , основу на математичному апараті диференціальних

перетворень функцій і рівнянь, які запропоновані в роботах [5-7]. 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  $k$ . Функція  $X(k)$  має вигляд

$$X(k) = \frac{H^k}{k!} \left[ \frac{d^k x(t)}{dt^k} \right]_{t=0}, \quad k=0,1,2,\dots,N, \quad (3)$$

де  $H$  – масштабна змінна;

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

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

У цьому випадку  $X(k)$  називається дискретною функцією цілочислового аргументу  $k$  [5–7].

На основі виразу (3) запишемо вигляд сигналу управління в області зображень (2):

$$U(k) = H^k u_k. \quad (4)$$

Для визначення диференціальної моделі двигуна постійного струму, описаного системою диференціальних рівнянь (1), скористаємося властивістю похідної  $D$  в області зображень [5–7]:

$$\begin{aligned} DX(k) &= \frac{k+1}{H} X(k+1), \\ 0 &\leq k \leq n. \end{aligned} \quad (5)$$

Скориставшись правилом диференціювання в області зображень (5), отримаємо систему рівнянь для визначення дискрет диференціального спектра двигуна постійного струму (ДПС). Застосувавши диференціальні перетворення та властивість (5) до виразу (1), отримаємо модель ДПС в області зображень [5]:

$$\begin{cases} I(k) = \frac{1}{R} (U(k) - C_w W(k)), \\ W(k+1) = \frac{H}{(k+1)} \frac{(C_m I(k) - \delta(k) M_c)}{J}, \\ Y(k+1) = \frac{H}{(k+1)} W(k). \end{cases} \quad (6)$$

Розглянемо задачу пошуку сигналу управління  $u(t)$  виду (7), нехтуючи моментом сил сухого тертя  $M_c$  [4]:

$$u(t) = u_0 + u_1 t. \quad (7)$$

На основі виразу (3) визначимо диференціальний спектр управляючого сигналу  $u(t)$  (7) і отримаємо

$$\begin{aligned} U(0) &= u_0, \\ U(1) &= u_1 H, \end{aligned} \quad (8)$$

$$U(k \geq 2) = 0.$$

Для визначення невідомих величин  $u_0$  та  $u_1$  сигналу управління  $u(t)$  (7) складемо систему рівнянь. Для цього використаємо властивість суми дискрет диференціального спектра та кінцеві термінальні умови  $\vec{Y}_H = |y_H, \omega_H|^T$ :

$$\begin{cases} Y(0) + Y(1) + Y(2, u_0) + Y(3, u_0, u_1) = y_H, \\ W(0) + W(1, u_0) + W(2, u_0, u_1) = \omega_H. \end{cases} \quad (9)$$

У системі рівнянь (9)  $Y(0)$  та  $W(0)$  є відомими та визначаються відповідно до виразу (10), використовуючи значення вектора початкового стану  $\vec{Y}_0 = |y_0, \omega_0|^T$ :

$$\begin{aligned} W(0) &= \omega_0, \\ Y(0) &= y_0. \end{aligned} \quad (10)$$

Величини  $W(1), W(2), Y(1), Y(2), Y(3)$  розраховуються відповідно до моделі ДПС в області зображень:

$$W(1) = \frac{CmH}{JR} (u_0 - CwW(0)); \quad (11)$$

$$W(2) = \frac{CmH}{2JR} (u_1 H - CwW(1)); \quad (12)$$

$$Y(1) = HW(0); \quad (13)$$

$$Y(2) = \frac{H}{2} W(1); \quad (14)$$

$$Y(3) = \frac{H}{3} W(2). \quad (15)$$

Таким чином, задача пошуку сигналу управління  $u(t)$  на інтервалі  $t \in [0, H]$  зводиться до розв'язання системи алгебраїчних рівнянь (9) відносно невідомих  $u_0$  та  $u_1$ . Підставивши вирази (11)–(15) в (9), отримаємо

$$\begin{cases} \frac{H^2 Cm}{JR} \left( \frac{1}{2} - \frac{HCmCw}{6JR} \right) u_0 + \frac{H^3 Cm}{6JR} u_1 + H \left( 1 - \frac{HCmCw}{2JR} + \frac{H^2 Cm^2 Cw^2}{6R^2 J^2} \right) \omega_0 + y_0 - y_H = 0, \\ \frac{HCm}{JR} \left( 1 - \frac{HCmCw}{2JR} \right) u_0 + \frac{H^2 Cm}{2JR} u_1 + \left( 1 - \frac{HCmCw}{JR} + \frac{H^2 Cm^2 Cw^2}{2R^2 J^2} \right) \omega_0 - \omega_H = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Якщо невідомі параметри  $u_0$  та  $u_1$  сигналу управління  $u(t)$  утворюють вектор  $\vec{U} = (u_0, u_1)^T$ , то розв'язок системи рівнянь (16) можливо подати у вигляді:

$$\vec{U} = A\vec{Y}_H - B\vec{Y}_0, \quad (17)$$

де матриці  $A$  та  $B$  мають вигляд:

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

$$B = \begin{pmatrix} \frac{6JR}{H^2 C_m} & \frac{4JR - HC_m C_w}{HC_m} \\ \frac{6HC_m C_w - 12JR}{H^3 C_m} & -\frac{6JR - 4HC_m C_w}{H^2 C_m} \end{pmatrix}.$$

На основі інформації про поточні  $y_0, \omega_0$  та кінцеві  $y_H, \omega_H$  значення фазових координат за виразом (17) обчислюється сигнал управління двигуном постійного струму  $u(t)$  на кожний наступний інтервал управління. Таким чином реалізується замкнутий закон термінального управління (рис. 2).

Для дослідження отриманого розв'язку задачі синтезу термінального управління скористаємося моделлю (6) двигуна постійного струму незалежного збурення МІ-32 з параметрами  $R = 0,368$  [Ом],  $C_m = 0,354$  [Н / А],  $C_w = 0,409$  [В · с / рад],  $J = 0,0132$  [кг · м<sup>2</sup>]. Результати числового моделювання якості запропонованої методики для випадку відпрацювання вхідного впливу у вигляді одиничної функції зображені на рис. 3.

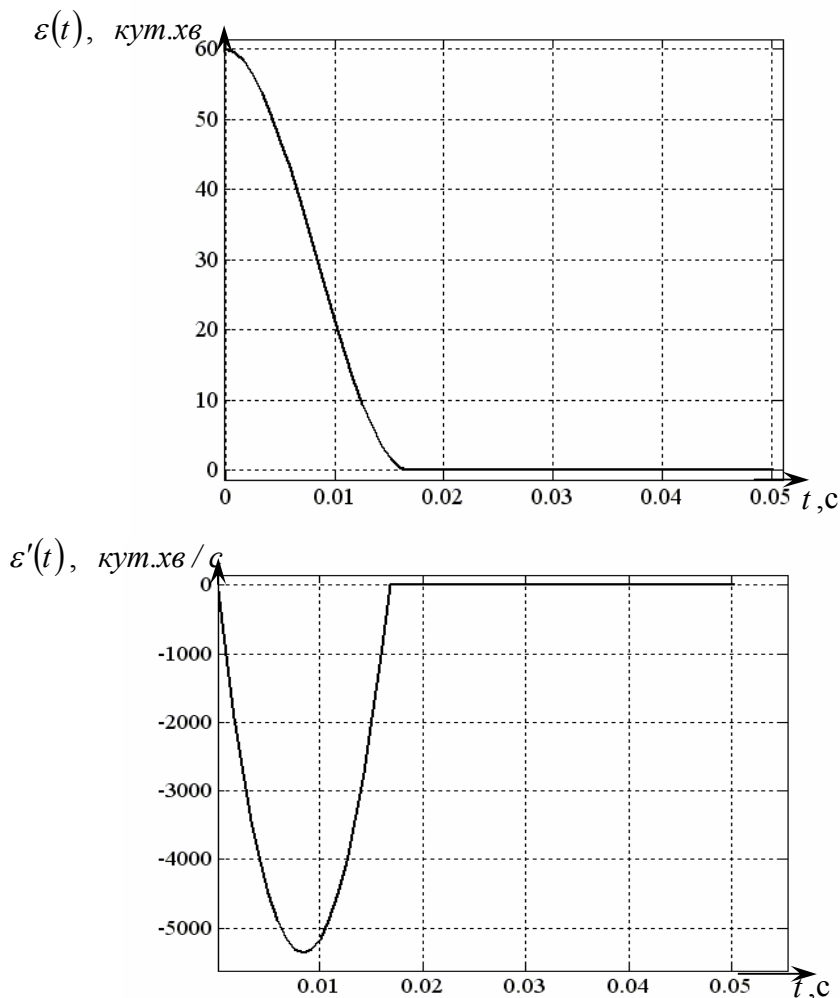


Рис. 3. Результати моделювання для одиничного вхідного впливу

Досліджуючи залежності помилок відпрацювання задавального впливу по положенню  $\varepsilon(t)$  та кутовій швидкості  $\varepsilon'(t)$ , можна побачити, що сигнал управління

забезпечує відсутність помилки у встановленому режимі. Крім того, тривалість перехідного процесу для даного типу двигуна становить 0,01685 с.

На рис. 4 зображені результати дослідження роботи методики синтезу термінального управління для випадку, коли на вхід системи подається лінійний вплив  $x(t)$ , де

$$x(t) = 12t. \quad (18)$$

Як і для одиничного вхідного впливу, так і для лінійного (18) сигнал управління забезпечує відсутність помилки після закінчення перехідних процесів. Тривалість перехідного процесу становить 0,01688 с.

Становить інтерес якість роботи методики синтезу термінального управління за наявності похибки вимірювання поточного положення  $y_0$  та швидкості  $\omega_0$ , яка спричинена особливостями роботи цифрових вимірювачів кутових величин. Для цього проведено моделювання роботи цифрового регулятора при використанні дванадцятирозрядного цифрового датчика вимірювання кутового положення. Результати моделювання зображені на рис. 5.

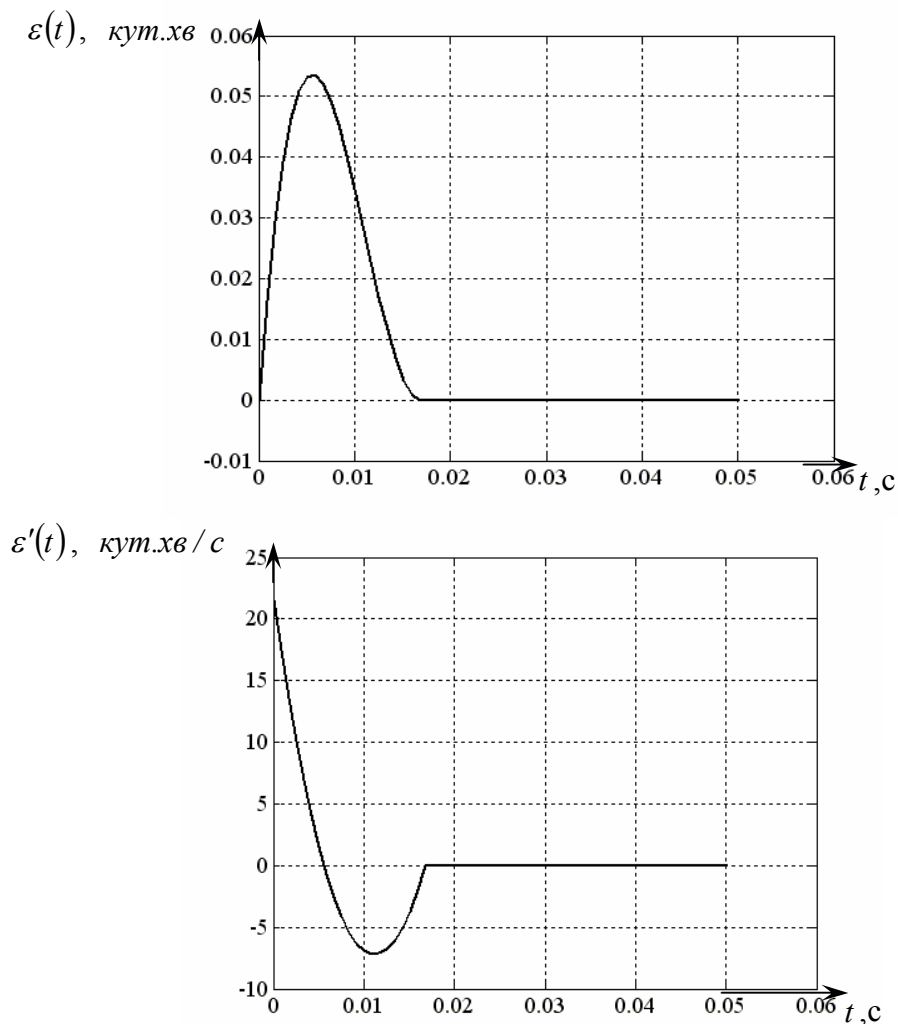
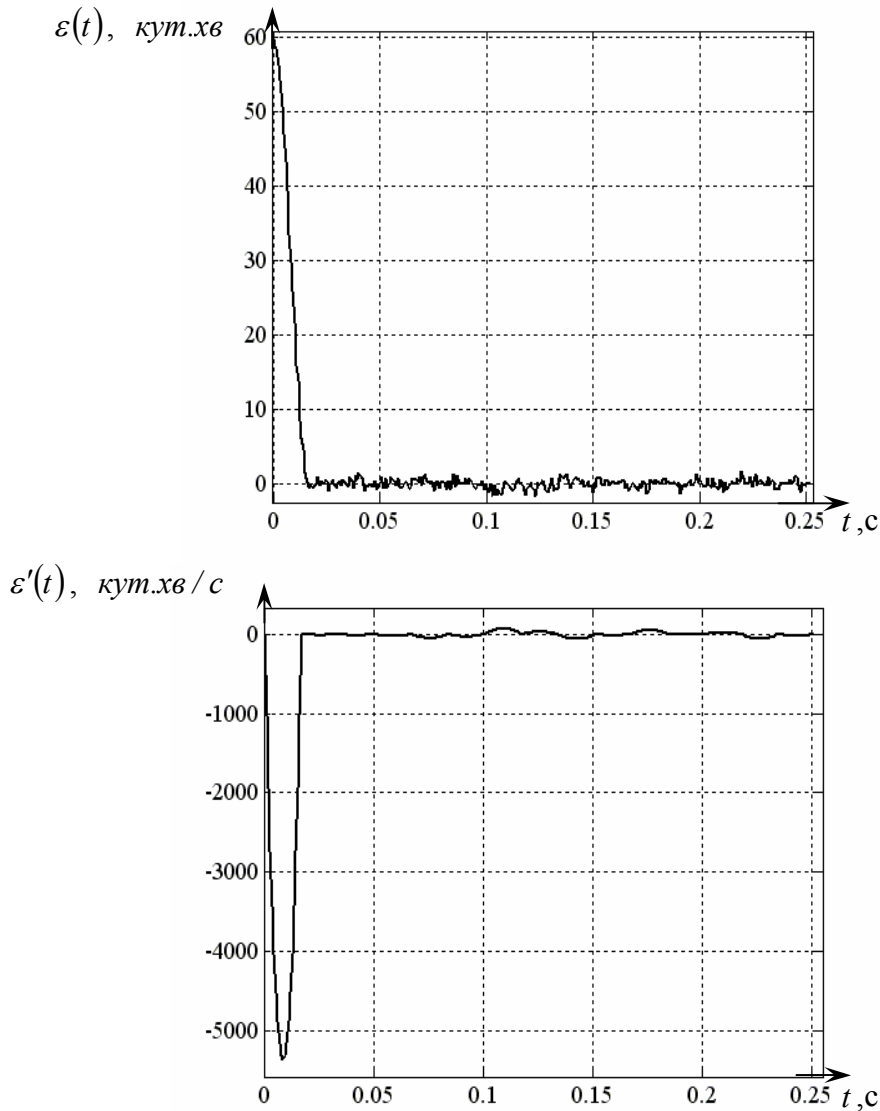


Рис. 4. Результати моделювання для лінійного вхідного впливу

Аналізуючи залежності помилок відпрацювання задавального впливу по положенню  $\varepsilon(t)$  та кутовій швидкості  $\varepsilon'(t)$ , встановлено, що запропонована методика не здійснює фільтрацію заводового впливу. Крім того, видно, що система не втратила своєї стійкості, а величина помилки по положенню не перевищує 1,5 кут.хв, по кутовій швидкості – 75.5 кут.хв/с.



*Рис. 5. Результати моделювання для одиничного вхідного впливу та завади у вигляді білого шуму*

**Висновки з проведеного моделювання та напрямки подальших розробок**

Проведене моделювання свідчить про відсутність помилки при супроводженні КА, координати якого представляють детерміновану функцію. Дослідження якості роботи методики синтезу термінального сигналу управління виявило той факт, що вона не здійснює фільтрацію шумів, які викликані особливостями побудови цифрових датчиків. Отже, дана методика дозволяє отримати сигнал управління, який забезпечує надійний прийом інформації ДЗЗ високої розрізненості.

Значення помилки зі швидкості супроводження в кінці інтервалу досягає нульового значення. Але її величина в середині інтервалу управління свідчить про перевантаження двигуна.

У подальшому планується провести визначення сигналу управління  $u(t)$ , який буде оптимізувати функціонал вигляду:

$$J(u_0, u_1, H) = \int_0^H i^2(t) dt . \quad (19)$$

Вибір функціонала (19) 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 запропонована 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. Результат можна використовувати при замкненому циклі управління ССП станції прийому інформації ДЗЗ високої розрізненості від низькоорбітальних КА.

Наводиться приклад розрахунку сигналу термінального управління для двигуна постійного струму МІ-32. За результатами моделювання показана висока точність наведення антени під час сеансу прийому інформації ДЗЗ.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гостев В. И. Системы управления с цифровыми регуляторами: справочник / В. И. Гостев. – К. : Техника, 1990. – 280 с.
2. Кучеров Д. П. Алгоритмы адаптивного терминального управления объектами второго порядка с запаздыванием / Д. П. Кучеров // Збірник наукових праць. – ЖВІРЕ : ЖВІРЕ. – Житомир, 2007. – Вип. 11. – С. 136–145.
3. Урусский О. С. Синтез замкнутых законов терминального управления на основе дифференциальных преобразований / О. С. Урусский, В. Л. Баранов // Электронное моделирование. – 1996. – 18. – № 3. – С. 3–8.
4. Теория автоматического управления / [Воронов А. А., Ким Д. П., Лохин В. М. и др.]. – [2-е изд.]. – М. : Высшая школа, 1986. – 504 с.
5. Пухов Г. Е. Дифференциальные спектры и модели / Г. Е. Пухов // Ин-т проблем моделирования в энергетике. – К. : Наукова думка, 1990. – 184 с.
6. Програмне та математичне забезпечення ЕОМ: диференціальні моделі військово-прикладних задач Ч. 1 / [Баранов В. Л., Баранов Г. Л., П'яковський Д. В., Водоп'ян С. В.]. – Житомир : ЖВІРЕ, 2003. – 76 с.

7. Програмне та математичне забезпечення ЕОМ: диференціальні моделі військово-прикладних задач Ч. 2 / [Баранов В. Л., Баранов Г. Л., П'ясковський Д. В., Водоп'ян С. В.]. – Житомир : ЖВІРЕ, 2006. – 44 с.

*Подано 12.06.08*

**В. Л. Баранов, Д. В. Пясковский, С. В. Водопян, Б. В. Молодецкий**

**МЕТОДИКА СИНТЕЗА ТЕРМИНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ СЛЕДЯЩИМ ПРИВОДОМ СТАНЦИИ ПРИЁМА ИНФОРМАЦИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

*В статье рассмотрена задача терминального управления исполнительным устройством станции приема информации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Предложена методика синтеза сигнала управления силовым следящим приводом (ССП) при сопровождении низкоорбитальных космических аппаратов (КА).*

**V. L. Baranov, D. V. Pyaskovsky, S. V. Vodopyan, B. V. Molodetsky**

**THE TECHNIQUE OF TERMINAL CONTROL SIGNAL OF EARTH REMOTE SENSING INFORMATION RECEPTION STATION**

*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.*