

УДК 62-50

В.Л. Баранов<sup>1</sup>, Б.В. Молодецький<sup>2</sup><sup>1</sup> Центр космічної розвідки, Житомир<sup>2</sup> Житомирський військовий інститут Національного авіаційного університету, Житомир

## МЕТОДИКА СИНТЕЗУ ШІМ-УПРАВЛІННЯ ВИКОНАВЧИМ ДВИГУНОМ СИЛОВОГО СЛІДКУВАЛЬНОГО ПРИВОДУ

В статті розглядається процес програмного супроводження космічного апарата (КА) антенною системою в ході проведення сеансу прийому інформації дистанційного зондування землі (ДЗЗ). Запропонована методика синтезу сигналу ШІМ-управління двигуном постійного струму незалежного збурення, основана на визначенні допоміжного аналогового сигналу та проведений аналіз її роботи. Отримано у векторній формі модель цифрового регулятора. Відмічена можливість методики забезпечити оптимальний по тривалості і кількості переколювань перехідний процес.

**Ключові слова:** дистанційне зондування Землі, космічний апарат (КА), силовий слідувальний привод, термінальне управління.

### Вступ

Розвиток засобів обчислювальної техніки дозволив широко використовувати їх досягнення в системах автоматичного управління (САУ). На такі електронно-обчислювальні машини (ЕОМ) покладаються функції формування алгоритму роботи системи та розрахунку сигналу управління виконавчим пристроєм. Для виконавчих пристроїв малої потужності ЕОМ здатна безпосередньо подавати сигнал управління на об'єкт керування. Для виконавчих пристроїв великої потужності передбачається використання проміжного підсилювача сигналу управління для його подачі на потужний об'єкт управління.

Інтеграція ЕОМ в контур управління дозволяє набути високих динамічних показників роботи такої САУ, підвищити її точність та швидкість, покращити показники надійності та надасть можливість оперативної зміни програми функціонування.

**Аналіз стану задачі.** Система автоматичного керування з ЕОМ дозволяє реалізувати всі відомі види САУ. Найпоширенішими з них є системи стабілізації та програмні системи автоматичного регулювання. Типова структурна схема цифрового силового слідувального приводу (ССП) зображена на рис. 1.

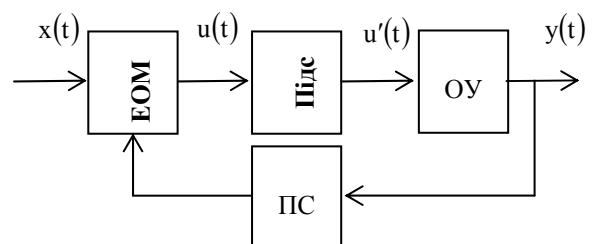


Рис. 1. Структурна схема ССП при термінальному управлінні

Відповідно до структурної схеми на вхід ЕОМ надходить розрахована програма управління у ви-

гляді функції  $x(t)$ . Розрахований сигнал управління  $u(t)$  через підсилювач (Підс) подається на об'єкт управління (ОУ), який формує вихідний сигнал  $y(t)$ . Аналіз якості функціонування відбувається в ЕОМ, яка враховує поточне значення вихідного сигналу  $y(t)$ , перетворене до необхідного виду перетворювачем сигналу (ПС).

Завдяки відміченим якостям цифрової САУ вона може бути використана при проведенні модернізації опорно-поворотного пристрою станції прийому інформації ДЗЗ високого розрізнення. Загальнодержавними космічними програмами України передбачається проведення робіт по модернізації існуючих радіотехнічних засобів. Розглядаючи космічну систему ДЗЗ високої розрізненості, а саме наземні станції прийому інформації, слід відмітити зростання вимог до точності супроводження космічного апарату (КА) під час проведення сеансу зв'язку. Це пов'язано високою швидкістю передачі інформації по радіоканалу «БОРТ-ЗЕМЛЯ», яка складає сотні Мбіт за секунду. Це, в свою чергу, призводить до використання радіосигналу в С та Х діапазоні частот. В такому випадку змінюється допустима помилка супроводження КА. Залежність допустимої помилки супроводження  $\Delta$  від діаметру дзеркальної антени  $D$  представлена на рис. 2. Невиконання вимог точності призведе до значних втрат корисної інформації та зниження якості матеріалів ДЗЗ.

Приступаючи до проведення модернізації силового слідкувального приводу (ССП), доцільно врахувати можливість реалізації на базі ЕОМ цифрового регулятора. Це дозволить покращити показники якості функціонування цифрового ССП станції прийому інформації ДЗЗ порівняно з аналоговим.

**Аналіз останніх досліджень.** Питанням дослідження динаміки дискретних систем з амплітудно-імпульсною модуляцією сигналу управління присвячені роботи професора В.І. Гостева.

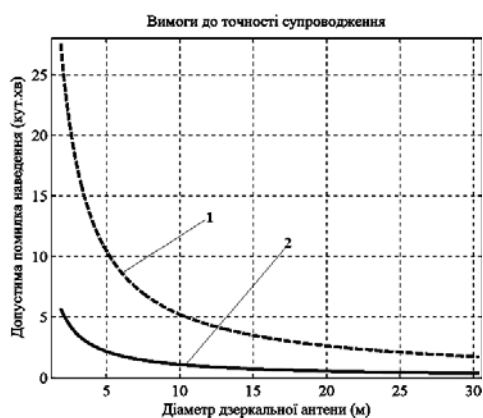


Рис. 2. Вимоги до точності супроводження КА: 1 – в С діапазоні частот; 2 – в Х діапазоні частот

Автором розглядається синтез цифрових систем оптимальних по швидкодії та якості перехідних

процесів [1]. Показана можливість математичного апарату з-перетворень проводити аналіз і синтез цифрових автоматичних систем з заданими показниками точності. Але більшість робіт, основаних на математичному апараті з-перетворень, обмежені системами з амплітудно-імпульсно модульованим сигналом управління виконавчим пристроєм. В 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 ШІМ-управління на основі допоміжних функцій переключення. Запропонований підхід потребує значних витрат машинного часу на ітераційний пошук сигналу управління, що в свою чергу ускладнює їх практичну реалізацію.

Процес термінального управління процесом виводу ракети-носія розглядається в роботі [3]. В ній запропоновано метод синтезу законів управління, побудований на диференціальних перетвореннях математичної моделі об'єкта управління в якості якого виступає двигун ракети.

Методика синтезу сигналу управління двигуном постійного струму розглядалась в роботі [4]. В ній показана можливість синтезу неперервного сигналу управління за допомогою диференціальних перетворень моделі об'єкта другого порядку, який забезпечує задані показники точності та швидкодії САУ.

**Постановка задачі.** Процес програмного наведення антенної системи на КА представляє собою задачу переведення її з поточної точки фазового простору  $\bar{Y}_0$  в кінцеву  $\bar{Y}_H$ , визначену вхідним сигналом  $x(t)$  за визначений час  $H$ . Тому такий процес доцільно розглядати з точки зору термінальної системи. Задачі в подібній постановці, але для іншого об'єкта управління, вирішувались у роботах [2 3]. Отримана в них методика не може бути застосована у силовому слідкуючому приводі без доопрацювання. Це пов'язано з необхідністю витримувати жорстко заданий часовий графік наведення антенної системи в ході проведення сеансу зв'язку з КА.

У опорно-поворотному пристрої станції прийому інформації ДЗЗ високого розрізнення в якості об'єкта управління виступає двигун постійного струму з незалежним збуренням. Він описується системою диференціальних рівнянь виду:

$$\begin{cases} \dot{i}(t) = \frac{1}{R} \times [u(t) - Cw \times \omega(t)], \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} v [Cm \times i(t) - Mc], \\ \frac{dy(t)}{dt} = \omega(t). \end{cases} \quad (1)$$

У системі диференціальних рівнянь (1)  $u(t)$  – сигнал управління  $[B]$ ;  $Cw = k_{\Phi} \times \Phi_3 \left[ \frac{B \cdot c}{\text{рад}} \right]$ , де

$k_\Phi$  – конструктивний коефіцієнт двигуна постійного струму  $\left[ \frac{В \cdot с}{рад \cdot Вб} \right]$ ;  $\Phi_3$  – магнітний потік збудження  $[Вб]$ ;  $R$  – активний опір обмоток якоря  $[Ом]$ ;  $i(t)$  – струм якоря  $[А]$ ;  $C_m$  – постійна двигуна за моментом  $\left[ \frac{Н \cdot м}{А} \right]$ ;  $J$  – момент інерції, перерахований до валу двигуна  $[кг \cdot м^2]$ ,  $M_c$  – момент сухого тертя  $[Н \cdot м]$ ,  $y(t)$ ,  $\omega(t)$  – кутове положення та кутова швидкість валу двигуна  $[рад]$ ,  $\left[ \frac{рад}{с} \right]$ .

При термінальному управлінні процес супроводження КА під час сеансу зв'язку розбивається на інтервали управління  $H$  та розглядається на кожному інтервалі окремо. В такому випадку силовий слідувальний привод (ССП) станції прийому інформації ДЗЗ можна побудувати по типовій структурній схемі цифрової САУ (рис. 1). Задача термінального управління на інтервалі  $H$  полягає у переводі динамічного об'єкта (1) з заданого початкового стану  $\vec{Y}_0 = (y_0, \omega_0)^T$  в кінцевий (термінальний)  $\vec{Y}_H = (y_H, \omega_H)^T$ , за допомогою неперервного сигналу управління  $u(t)$  вигляду:

$$u(t) = \sum_{i=0}^n u_i \times t^i = f(\vec{Y}_0, \vec{Y}_H, H), \quad t \in [0 \dots H], \quad (2)$$

де  $y_0 = y(0), \omega_0 = y'(0),$   
 $y_H = x(H), \omega_H = x'(H).$

### Виклад основного матеріалу

Розглянемо методику синтезу сигналу ШІМ-управління  $V_{ШІМ}$ , основу на математичному апараті диференціальних перетворень функцій і рівнянь, які запропоновані в роботах [5 – 7]. Даний метод не потребує чисельного 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  $X(k)$  цілочисельного аргументу  $k$ , де  $X(k)$  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 спектру (значення функції  $x(t)$  в області зображень).

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

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

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

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

$$DX(k) = \frac{k+1}{H} X(k+1), \quad (5)$$

$$0 \leq k \leq n.$$

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

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

де  $\delta(k) = \begin{cases} 1, k = 0, \\ 0, k > 0 \end{cases}$  – теда-функція [5].

Записана система алгебраїчних рівнянь (6) представляє собою модель ДПС в області зображень [5].

Розглянемо задачу пошуку допоміжного неперервного сигналу управління  $u(t)$  вигляду (7) та нехтуючи моментом сил сухого тертя  $M_c = 0$ .

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

На основі виразу (3) визначимо його диференціальний спектр. Отримаємо

$$\begin{aligned} U(0) &= u_0; \\ U(1) &= u_1 \times H; \\ U(2) &= u_2 \times H^2. \end{aligned} \quad (8)$$

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

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

В системі рівнянь (9) дискрети  $Y(0)$  та  $W(0)$  визначаються, використовуючи значення вектора початкового стану  $\vec{Y}_0 = (y_0, \omega_0)^T$  і набувають вигляду:

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

Величини  $W(1)$ ,  $W(2)$ ,  $Y(1)$ ,  $Y(2)$ ,  $Y(3)$  розраховуються за формулами (11) – (15) відповідно.

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

$$W(2) = \frac{CmH}{2JR} [u_1H - CwW(1)]; \quad (12)$$

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

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

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

Таким чином, задача пошуку допоміжного сигналу управління  $u(t)$  на інтервалі  $t \in [0, H]$  зводиться до вирішення системи алгебраїчних рівнянь (9) відносно невідомих коефіцієнтів  $u_0$  та  $u_1$ . Підставивши вирази (11) – (15) в (9) та отримаємо:

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

Прийнявши, що невідомі параметри  $u_0$  та  $u_1$  сигналу  $u(t)$  утворюють вектор  $\vec{U} = (u_0, u_1)^T$  рішення системи алгебраїчних рівнянь (16) можна записати у вигляді:

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

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

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

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

На основі інформації про поточні  $y_0$ ,  $\omega_0$  та кінцеві  $u_H$ ,  $\omega_H$  значення фазових координат по виразу (17) обчислюється аналоговий сигнал управління двигуном постійного струму  $u(t)$  на кожний інтервал управління  $H$ . Таким чином реалізується замкнутий закон термінального управління (рис. 1).

При визначенні сигналу ШІМ-управління двигуном постійного струму необхідно врахувати обмеження на максимальне значення управляючої напруги  $E_{max}$ , яке може подаватися на виконавчий пристрій. В такому випадку сигнал управління на кож-

ний інтервал  $H$  визначається за допомогою виразу:

$$V_{ШИМ} = \begin{cases} E_{max} \times \text{sign} [A \times \vec{Y}_H - B \times \vec{Y}], \\ T_i = \frac{H}{E_{max}} v |A \times \vec{Y}_H - B \times \vec{Y}|, \end{cases} \quad (18)$$

де  $T_i$  – тривалість сигналу управління на інтервалі  $H$ .

Для дослідження отриманого рішення задачі синтезу термінального управління скористаємося моделлю двигуна постійного струму незалежного збудження МІ-32. Розглянемо результати роботи методики синтезу сигналу термінального ШІМ-управління силовим слідкувальним приводом при переводі системи автоматичного управління (рис. 1) на один градус з нульового початкового стану. Результат моделювання для випадку  $H = T_d = 33,53$ мс представлений на рис. 3. За результатами експерименту встановлено, що час встановлення складає  $t_v = 129,4$ мс; тривалість перехідного процесу становить  $t_p = 159,9$ мс, коефіцієнт перерегулювання  $\sigma = 2,82\%$ , ступінь затухання перехідного процесу  $\psi = 81,5\%$ .

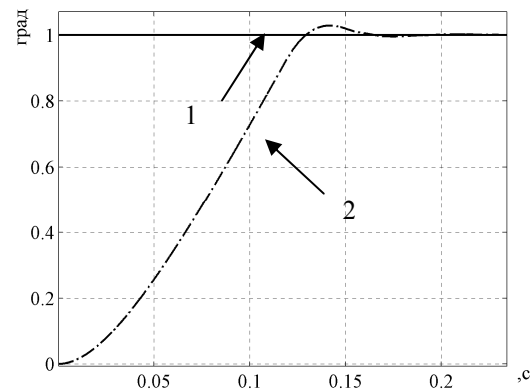


Рис. 3. Перехідна характеристика цифрової системи:  
1 – одиничний вхідний вплив;  
2 – результат роботи цифрового регулятора

Розглянемо результати роботи розробленої методики синтезу сигналу ШІМ-управління силовим слідкувальним приводом системи автоматичного управління, представленої на рис. 1 при нульовому початковому стані в період проходження космічним апаратом зеніту. Для цього використаємо вхідний сигнал цифрового регулятора у вигляді лінійного впливу вигляду.

$$x(t) = 12 \times t^2. \quad (19)$$

На рис. 4 представлений результат роботи запропонованої методики у вигляді залежності помилки супроводження виміряної в кутових хвилинах.

Досліджувався випадок, коли величина інтервалу управління  $H = T_d = 33,53$ мс. Аналіз залежності величини помилки супроводження від часу показав, що тривалість перехідного процесу, коли компенсується початкова помилка по швидкості, становить 234 мс. Максимальне значення полки в перехідному режимі досягає величини 15,75'. Значення помилки супроводження в сталому режимі для термінального сигналу ШІМ-управління складає 0,111'.

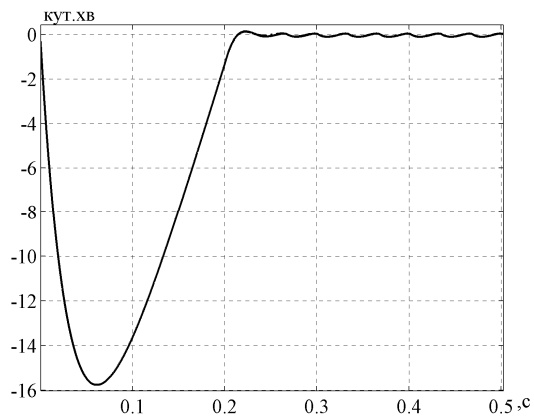


Рис. 4. Графік залежності величини помилки від часу

### Висновки

В статті представлена методика синтезу замкнутого термінального сигналу ШІМ-управління на основі диференціальних перетворень. Особливість представленої методики полягає в тому, що розв'язок задачі синтезу термінального управління двигуном постійного струму силового слідкуючого приводу станції прийому інформації ДЗЗ зводиться до розв'язання системи алгебраїчних рівнянь.

Отримано у векторній формі модель цифрового регулятора. Вона має векторний вхід  $\bar{Y}_0$ ,  $\bar{Y}_H$  і проводить управління кутовим положенням та кутовою швидкістю антенної системи на протязі сеансу зв'язку з КА. Результат можливо використовувати при замкненому циклі управління силовим слідкувальним приводом станції прийому інформації ДЗЗ високого розривнення від низькоорбітальних КА.

Наводиться приклад розрахунку сигналу термінального управління для двигуна постійного струму МІ-32. Проведений аналіз роботи розробленої методики синтезу сигналу термінального ШІМ-управління. Відмічена можливість методики забезпечити

оптимальний по тривалості і кількості переколиваний перехідний процес.

### 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 // Проблемы створення, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. Технічні науки: зб. наук. пр. 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 // Электрон. моделирование. – 1996. – 18, № 3. – С. 3-8.
4. Молодецкий Б.В. Методика синтеза терминального управления объектом второго порядка / Б.В. Молодецкий, В.Л. Баранов // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – Житомир, 2007. – Вип. IV (47). – С. 93-99.
5. Воронов А.А. Теория автоматического управления: 2-е изд. / А.А. Воронов, Д.П. Ким, В.М. Лохин и др. – М.: Высш. шк., 1986. – 504 с.
6. Пухов Г.Е. Дифференциальные спектры и модели / Г.Е. Пухов. – К.: Наук. думка, Ин-т проблем моделирования в энергетике, 1990. – 184 с.
7. Баранов В.Л. Программе та математичне забезпечення ЕОМ: диференціальні моделі військово-прикладних задач. Частина I / В.Л. Баранов, Г.Л. Баранов, Д.В. П'яковський, С.В. Водоп'ян. – Житомир: ЖВІРЕ, 2003. – 76 с.
8. Баранов В.Л. Программе та математичне забезпечення ЕОМ: диференціальні моделі військово-прикладних задач Частина II / В.Л. Баранов, Г.Л. Баранов, Д.В. П'яковський, С.В. Водоп'ян. – Житомир: ЖВІРЕ, 2006. – 44 с.

Надійшла до редколегії 27.02.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. наук. співр. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### МЕТОДИКА СИНТЕЗА ШИМ-УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ СИЛОВОГО СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА

В.Л. Баранов, Б.В. Молодецкий

*В статье рассматривается процесс программного сопровождения космического аппарата (КА) антенной системой в ходе проведения сеанса приема информации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Предложена методика синтеза сигнала ШИМ-управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения, основанная на определении вспомогательного аналогового сигнала и проведен анализ ее работы. Получена в векторной форме модель цифрового регулятора. Отмечена возможность методики обеспечить оптимальный по длительности и количеству повторных колебаний переходный процесс.*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, космический аппарат (КА), силовой следящий привод, терминальное управление.

### TECHNIQUE OF PWM-SYNTHESIS OF MANAGEMENT OF THE EXECUTIVE ENGINE OF A POWER WATCHING DRIVE

V.L. Baranov, B.V. Molodetsky

*In clause process of program support of a space vehicle antenna system during carrying out of a session of reception of the information of remote sounding the Earth is considered. The technique of synthesis of PWM-signal of-management is offered by the engine of a direct current of independent excitation which is based on definition of an auxiliary analog signal. The model of digital regulator is got in a vectorial form. Possibility of method to provide optimum on duration and amount of over-fluctuation transitional process is marked.*

**Keywords:** remote sensing of Earth, space vehicle, power watching drive, terminal management.