

УДК 004.896: 681.51

**О.В. МНУШКА**, асс., ХНАДУ, Харків,

**О.Я. НИКОНОВ**, д-р техн. наук, проф., зав. каф., ХНАДУ, Харків,

**В.М. САВЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

## АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯМ СУПУТНИКОВОЮ АНТЕНОЮ

В роботі розглянуті традиційний і адаптивний ПІД-регулятори для системи керування позиціонуванням супутникової антени, яка встановлюється на транспортному засобі. Проведено імітаційне моделювання розробленого адаптивного ПІД-регулятора з нечітким контролером типу *Takagi-Sugeno-Kang* в *Matlab / Simulink*, показано, що він має малу чутливість до завад в контурі керування і кращу продуктивність для реалізації алгоритму покрового стеження в порівнянні з традиційними ПІД-регуляторами. Іл.: 5. Бібліогр.: 10 назв.

**Ключові слова:** нечіткий контролер, *Takagi-Sugeno-Kang*, адаптивна система керування, позиціонування, супутникова антена, алгоритм покрового стеження.

**Постановка проблеми.** Системи цифрової супутникової телекомунікації (СЦСТ) порівняно до аналогічних систем наземного базування дозволяють забезпечити якісними послугами абонентів у будь-якій точці земної поверхні за умови забезпечення прямої видимості телекомунікаційного супутника. Найбільш актуальними такі системи є для малонаселених територій, на яких економічно не вигідно розбудовувати наземні системи телекомунікацій, а також для мобільних абонентів, коли обладнання для прийому (та/або передавання) встановлюють на рухомі транспортні засоби (ТЗ) – пасажирські автобуси, судна, поїзди, тощо. Підвищення якості послуг у СЦСТ пов'язане із збільшенням діапазонів частот, які використовуються, що обумовлює перехід з *Ki*-діапазону до *Ka*-діапазону та підвищення вимог до точності позиціонування антенних установок (АУ) абонента, завадостійкості систем, вдосконалення апаратури та алгоритмів стеження за джерелом сигналу. Одним із шляхів удосконалення існуючих АУ є вдосконалення систем керування (СК) позиціонуванням їх антени з метою забезпечення покращених характеристик АУ та реалізації алгоритмів стеження за джерелом сигналу під час руху транспортного засобу [1, 2].

**Аналіз літератури.** Встановлення АУ на рухомий ТЗ має на меті забезпечити безперервне надання послуг кінцевому абоненту як під час руху, так і під час стоянки. Як показано у [3], простим та ефективним алгоритмом стеження є алгоритм покрового стеження (*step-tracking*)

*algorithm, STA*), що не вимагає складних конструктивно-технологічних рішень. Зважаючи на те, що під час руху АУ ТЗ працює під впливом випадкових завад, традиційні системи керування не завжди в змозі забезпечити якісне позиціонування антени, тому доцільним є використання нечітких або нейромережних СК [4 – 7]. В [4] запропоновано СК із нечітким регулятором ПД-типу. Показано, що при реалізації *STA* за рівнем прийнятого сигналу продуктивність СК істотно залежить від рівня сигналу, при цьому для каналу прийнятого сигналу, за умови  $1/T \leq 1$ , де  $T$  – постійна часу, доцільним є використання нечіткого регулятора, за інших умов – традиційного, наприклад ПІ. В [5] для АУ з двома степенями свободи проведено порівняння традиційного та нечіткого ПІД-регуляторів в системі керування модифікованої антени *SeaTel* 1898. Показано, що застосування нечіткого ПІД-регулятора дозволяє досягти заданих технічних характеристик, а його продуктивність є вищою у порівнянні із традиційними контролерами. В [6] проведено порівняльний аналіз різних варіантів реалізацій СК позиціонуванням АУ за азимутом. Показано, що в цілому нечіткі контролери (і *Mamdani*, і *Takagi-Sugeno*) мають переваги над традиційними ПІД-контролерами при наявності завад випадкового характеру у колі керування. В [7] наведено результати аналізу впливу виду функції приналежності та кількості правил нечіткого логічного висновку на параметри СК позиціонуванням за азимутом. Показано, що доцільним є використання нечітких контролерів з мінімальним набором правил та функціями приналежності простого виду (трикутних) і запропоновано адаптивну СК із нечіткими контролерами у колах контролю похибки та її похідної за часом.

Аналіз літературних джерел показує, що: 1) не має однозначних рекомендацій щодо застосування нечітких регуляторів у СК позиціонуванням АУ; 2) для забезпечення високої заданої продуктивності СК під впливом зовнішніх факторів доцільним є аналіз можливості використання СК на основі нечіткої логіки шляхом імітаційного моделювання, тому задача розробки таких систем та їх імітаційних моделей є актуальною.

**Метою статті** є розробка та імітаційне моделювання адаптивного ПІД-регулятора для системи керування позиціонуванням антени у складі АУ рухомого ТЗ.

**Адаптивна система керування позиціонуванням супутникової антени.** Розроблено адаптивну СК, в якій нечіткий контролер *Takagi-Sugeno-Kang (TSK)* використовується для регулювання коефіцієнтів ПІД-регулятора. Адаптивну систему керування виконано за класичною

схемою (рис. 1, [8]) і вона містить: 1) узагальнений об'єкт керування (УОК), який складається з антени (навантаження), двигуна та редуктора та описується передатною функцією  $W(p) = \frac{2083}{s^3 + 101.7s^2 + 171s}$  [6]; 2) традиційний ПІД-регулятор; 3) ланку зворотного зв'язку (сенсор); 4) нечіткий контролер (НК), на входи якого подають сигнал помилки  $e(t) = r(t) - y(t)$  та його похідну. На виході НК формуються величини  $K_p$ ,  $K_d$  та  $K_i$ , які використовують для корегування відповідних коефіцієнтів ПІД-регулятора та величини сигналу керування  $u(t)$ .

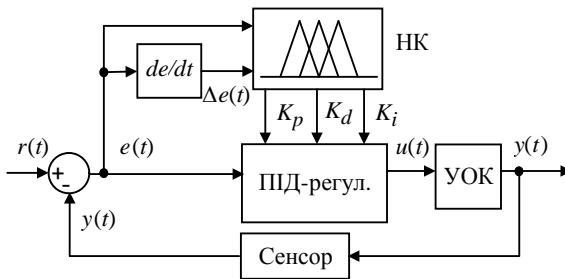


Рис.1. Адаптивна СК із ПІД-регулятором

Нечіткий блок адаптивного регулятора виконано по схемі ПД+І регулятора [9, 10] з метою зменшення бази правил та підвищення продуктивності СК (рис. 2). Коефіцієнти підсилення  $K_{ie}$ ,  $K_e$ ,  $K_{\Delta e}$ ,  $K_u$  та відповідні коефіцієнти пропорційної, інтегруючої та диференціюючої ланок ПІД-регулятора  $K_p = K$ ,  $K_i = KT_i^{-1}$ ,  $K_d = KT_d$  пов'язані співвідношеннями (1) [10]:

$$K_p = K_u K_e, \quad 1/T_i = K_{ie} K_e, \quad T_d = K_{\Delta e} K_e. \quad (1)$$

Функція керування ПІД-регулятора

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de}{dt} \right)$$

в дискретній формі в кожний дискретний момент часу  $k$  має вигляд

$$u(k) = K \left( e_k + \frac{1}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j + T_d \Delta e_k \right) \quad (2)$$

або у паралельній рекурентній формі

$$u_k = u_k + K_1 e_k + K_2 e_{k-1} + K_3 e_{k-2}, \quad k = \overline{1, N}, \quad (3)$$

де  $K_1 = K_p + K_d + K_i$ ,  $K_2 = -K_p - 2K_d$ ,  $K_3 = K_d$  – параметри регулятора, що налаштовуються;  $N$  – число відліків часу. Підставляючи (1) в (2) або (3) та задавшись величиною  $K_e = \max(e_k)$ , отримують відповідні коефіцієнти нечіткого регулятора.

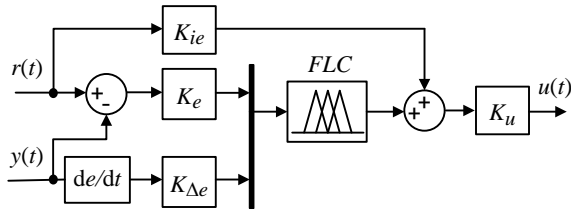


Рис. 2. Структура нечіткого ПД+І контролера

З метою реалізації (2) та (3) було визначено діапазони зміння вхідних та вихідних величин, сформовано базу правил з урахуванням: 1) для великих значень  $e_k$ :  $K_p$  – велике,  $K_d$  – мале,  $K_i \rightarrow 0$ ; 2) для середніх значень  $e_k$ :  $K_p$  – мале, а  $K_d$  та  $K_i$  обирають відповідно до вимог забезпечення мінімального перерегулювання; 3) для малих значень  $e_k$ :  $K_p$  та  $K_i$  – великі, а  $K_d$  обирають відповідно до величини  $\Delta e_k$  з метою запобігання коливальному процесу ( $\Delta e_k$  – велике (мале),  $K_d$  – мале (велике)).

Для реалізації нечіткого контролера TSK визначимо лінгвістичні змінні  $E(e_k)$  та  $dE(\Delta e_k)$  на множині {"додатний", "від'ємний"} із гаусовою функцією приналежності виду  $\mu_G(x) = e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}$ , де  $b$  – координата максимуму;  $c$  – коефіцієнт концентрації. Лінгвістичну змінну  $U(u_k)$  визначимо на множині константних значень  $\{-U_{\max}, 0, +U_{\max}\}$ . Вхідна та вихідна змінні зв'язані наступними правилами:

1. Якщо  $E$  є від'ємною і  $dE$  є від'ємною, то  $U$  дорівнює  $-U_{\max}$ .
2. Якщо  $E$  є від'ємною і  $dE$  є додатною, то  $U$  дорівнює 0.
3. Якщо  $E$  є додатною і  $dE$  є від'ємною, то  $U$  дорівнює 0.
4. Якщо  $E$  є додатною і  $dE$  є додатною, то  $U$  дорівнює  $+U_{\max}$ .

Розроблено імітаційну модель адаптивної СК (рис. 3) та проведено імітаційне моделювання її параметрів. Результати отримано для часу дискретизації  $T_s = 0.01$  с. Попереднє налаштування ПІД-регуляторів виконано за методом Ziegler-Nicols,  $K_p = 2.32$ ,  $K_i = 0.29$ ,  $K_d = 0.82$ .

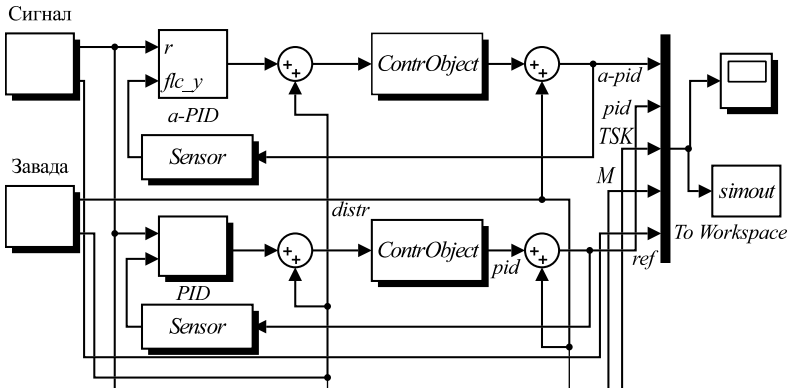


Рис. 3. Імітаційна схема СК у Simulink (фрагмент)

Аналіз перехідної характеристики показує, що адаптивний регулятор у порівнянні з традиційним має менші час встановлення та перерегулювання (рис. 4 а), а також швидше реагує на завади в контурі керування (білий шум в момент часу  $t = 7$  с, рис. 4 б).

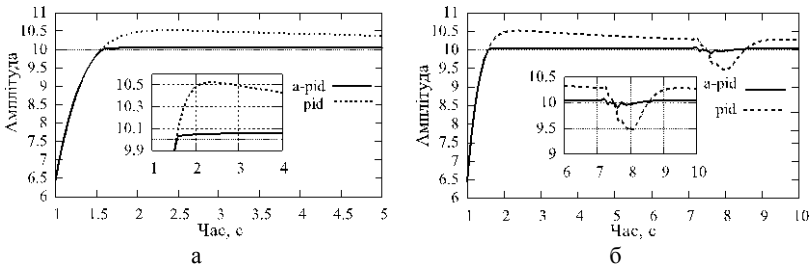


Рис. 4. Перехідна характеристика СК

Для оцінки режиму спостереження на вхід було подано сигнал ступінчастої форми еквівалентний оберненню антени на  $\pm 180^\circ$  з амплітудою ступені 1 В та тривалістю 3 с (рис. 5 а) та пілоподібний сигнал з амплітудою  $\pm 3$  В та періодом, що приблизно дорівнює часу встановлення системи (рис. 5 б). Адаптивний регулятор має менші похибки на будь-якому кроці, на відміну від традиційного (рис. 5 а), такі ж самі висновки можна зробити щодо режиму захоплення джерела сигналу (рис. 5 б).

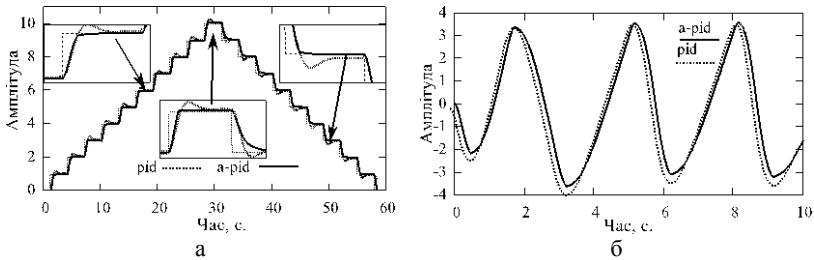


Рис. 5. Робота СК в режимі покрокового стеження

**Висновки.** Проаналізовано способи реалізації ПІД-регуляторів для системи керування позиціонуванням супутникової антени, яку встановлюють на транспортний засіб. Розроблено адаптивний ПІД-регулятор з нечітким контролером типу *Takagi-Sugeno-Kang*. Проведено порівняльне імітаційне моделювання адаптивного та традиційного регуляторів в *Matlab / Simulink*. Показано, що адаптивний регулятор має малу чутливість до впливу завод на контур керування та більшу продуктивність для реалізації алгоритму покрокового стеження (рис. 4 б, 5). В цілому, результати моделювання добре корелюються з результатами, отриманими в [7] для іншої моделі адаптивної СК. Додаткового вивчення вимагає питання оптимізації параметрів адаптивної СК для великих варіацій вхідного сигналу, що має місце при встановленні початкового кутового положення антени (рис. 5 б). Результати роботи можуть бути використаними для аналізу та синтезу адаптивних СК кутовим положенням антени та в інших подібних застосуваннях.

**Список літератури:** 1. Corazza G. Digital Satellite Communication / G. Corazza. – Springer, 2007. – 535 p. 2. Hao L. SPSA-based Step Tracking Algorithm for Mobile DBS Reception / L. Hao, M. Yao // Simul. Modell. Pract. and Theory. – 2011. – Vol. 19. – Is. 2. – P. 837-846. 3. Мнушка О.В. Системы управления позиционированием и слежением мобильных спутниковых антенных установок / О.В. Мнушка / Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 5. – № 9 (65). – С. 39-45. 4. Lin J.-M. Intelligent PD-type

Fuzzy Controller Design for Mobile Satellite Antenna Tracking System with Parameter Variations Effect / *J.-M. Lin, Po-K. Chang* // IEEE Sym. on Comp. Intel. in Contr. and Autom. – 2011. – P. 1-5. **5.** *Kim J.-K.* Simplified Fuzzy-PID Controller of Data Link Antenna / *J.-K. Kim, S.-H. Park, T. Jin* // Int. Conf. PRICAI 2006, LNAI. – Springer, 2006. – P. 1083-1088. **6.** *Mnushka O.* Simulation of the Antenna Azimuth Position Control System with Fuzzy PID-like Controller / *O. Mnushka* // Int. Conf. TCSET'2014. – Lviv, 2014. – P. 162-163. **7.** *Okumus H.I.* Antenna Azimuth Position Control with Fuzzy Logic and Self-Tuning Fuzzy Logic Controllers / *H.I. Okumus; E. Sahin; O. Akyazi* // Int. Conf. ELECO'2013. – 2013. – P. 477-481. **8.** *Михайленко В.С.* Методи настройки нечеткого адаптивного ПИД-регулятора / *В.С. Михайленко, В.Ф. Ложечников* // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2009. – № 2. – С. 174-179. **9.** *Jantzen J.* Foundations of Fuzzy Control: a Practical Approach / *J. Jantzen*. – Wiley, 2013. – 325 p. **10.** *Xu J.X.* Parallel Structure and Tuning of a Fuzzy PID Controller / *J.X. Xu, C.C. Hang, C. Liu* // Automatica. – 2000. – Vol. 36. – P. 673-684.

**Bibliography (transliterated):** **1.** *Corazza G.* Digital Satellite Communication / *G. Corazza*. – Springer, 2007. – 535 p. **2.** *Hao L.* SPSA-based Step Tracking Algorithm for Mobile DBS Reception / *L. Hao, M. Yao* // Simul. Modell. Pract. and Theory. – 2011. – Vol. 19. – Is. 2. – P. 837-846. **3.** *Mnushka O.V.* Sistemy upravleniya pozitsionirovaniem i slezheniem mobil'nykh sputnikovyykh antenykh ustanovok / *O.V. Mnushka* // Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii. – 2013. – T. 5. – № 9 (65). – S. 39-45. **4.** *Lin J.-M.* Intelligent PD-type Fuzzy Controller Design for Mobile Satellite Antenna Tracking System with Parameter Variations Effect / *J.-M. Lin, Po-K. Chang* // IEEE Sym. on Comp. Intel. in Contr. and Autom. – 2011. – P. 1-5. **5.** *Kim J.-K.* Simplified Fuzzy-PID Controller of Data Link Antenna / *J.-K. Kim, S.-H. Park, T. Jin* // Int. Conf. PRICAI 2006, LNAI. – Springer, 2006. – P. 1083-1088. **6.** *Mnushka O.* Simulation of the Antenna Azimuth Position Control System with Fuzzy PID-like Controller / *O. Mnushka* // Int. Conf. TCSET'2014. – Lviv, 2014. – P. 162-163. **7.** *Okumus H.I.* Antenna Azimuth Position Control with Fuzzy Logic and Self-Tuning Fuzzy Logic Controllers / *H.I. Okumus, E. Sahin, O. Akyazi* // Int. Conf. ELECO'2013. – 2013. – P. 477-481. **8.** *Mikhailenko V.S.* Metody nastroiки nechetkogo adaptivnogo PID-regulyatora / *V.S. Mikhailenko, V.F. Lozhechnikov* // Avtomatika. Avtomatizatsiya. Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy. – 2009. – № 2. – S. 174-179. **9.** *Jantzen J.* Foundations of Fuzzy Control : a Practical Approach / *J. Jantzen*. – Wiley, 2013. – 325 p. **10.** *Xu J.X.* Parallel Structure and Tuning of a Fuzzy PID Controller / *J.X. Xu, C.C. Hang, C. Liu* // Automatica. – 2000. – Vol. 36. – P. 673-684.

Надійшла (received) 31.03.2015

*Статтю представив д.т.н., проф. Харківського національного автомобільно-дорожнього університету Бажинов А.В.*

Mnushka Oksana, postgraduate student  
National Automobile and Highway University  
Str. Petrovskogo, 25, Kharkiv, Ukraine, 61002  
Tel.: (067) 5767863, e-mail: mnushka@live.com  
ORCID ID: 0000-0001-7756-9260

Nikonov Oleg, Dr. Sci. Tech, Professor  
National Automobile and Highway University  
Str. Petrovskogo, 25, Kharkiv, Ukraine, 61002  
Tel.: (050) 7505010, e-mail: oj\_nikonov@mail.ru  
ORCID ID: 0000-0002-6588-7760

Savchenko Volodymyr, Cand. Sci. Tech  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
Str.Frunze, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002  
Tel.: (067) 5767864, e-mail: savchenko@live.com  
ORCID ID: 0000-0001-6548-0891