

УДК 62-55.681.515

Д.В. Кір'янов

Військовий інститут Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Київ

## МОДЕЛЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПІДЙОМОМ АНТЕННОЇ ЩОГЛИ В УМОВАХ ВІТРОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Розроблено та досліджено методом математичного моделювання модель системи автоматичного керування (САК) підйомом антенної щогли на основі нечіткого регулятора в умовах динамічних вітрових навантажень. Досліджені залежності якості роботи САК від різних типів вітрового навантаження та зміни параметрів антенної щогли.

**Ключові слова:** антенна щогла, система автоматичного керування, цифровий нечіткий регулятор, якість управління, математична модель, моделювання.

### Вступ

**Постановка проблеми.** В системах зв'язку військового призначення в польових умовах широко застосовуються рухомі радіорелейні станції (РРС). Від їх ефективного застосування значною мірою залежить успіх вирішення завдань, що стоять перед системою зв'язку. Забезпечення своєчасної передачі інформації по каналах радіорелейного зв'язку суттєво залежить від їх мобільності. Існуючі засоби радіорелейного на сучасному етапі розвитку не відповідають вимогам щодо мобільності системи зв'язку.

Основними недоліками існуючих зразків рухомих станцій радіорелейного зв'язку є значний час підготовки їх до застосування та велика трудомісткість операцій при розгортанні антенно-щоглових пристроїв.

Для усунення цих недоліків РРС військового призначення необхідно скоротити час розгортання (згортання) антенно-щоглових пристроїв і замінити ручні операції, що виконуються людьми, діями автоматичних пристроїв. Це визначає необхідність створення системи автоматичного управління розгортанням антенної щогли.

Особливістю системи автоматичного керування підйомом антенної щогли є те, що телескопічна антенна щогла під час вертикального підйому є нелінійним нестаціонарним об'єктом керування (ОК) і знаходиться під впливом динамічних вітрових навантажень [1].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Перспективним шляхом вирішення поставленого завдання є застосування теорії нечітких множин із використанням методик синтезу цифрових нечітких регуляторів (НР) [2]. Використання нечітких регуляторів дозволяє підвищити динамічну точність та швидкодію систем автоматичного керування нестаціонарними об'єктами за рахунок формалізації процесу прийняття рішень на основі нечіткої логіки при кількісних параметрах стану системи [3].

Системи автоматичного керування на основі НР в багатьох випадках довели свою ефективність

завдяки тому, що дозволяють отримати більш високу якість (менші похибки в перехідних та сталих режимах) [4].

**Метою статті** є вдосконалення систем автоматичного розгортання антенно-щоглових пристроїв РРС як наукового завдання, сутність якого полягає у розробці та дослідженні моделі системи автоматичного керування підйомом антенної щогли на основі нечітких регуляторів в умовах дії критичних вітрових навантажень та зміни параметрів об'єкта керування.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Для вирішення завдання вітростійкого підйому антенної щогли система автоматичного керування розділена на дві системи автоматичного регулювання (САР). Кожна з САР працює в одній із двох взаємно перпендикулярних площин  $Y_1-Z-Y_2$  та  $X_1-Z-X_2$ , утворених верхівкою щогли (точка  $Z$ ) та виконавчими механізмами ( $ВМ_1-ВМ_4$ ).

Структурну схему САР положення антенної щогли в площині  $Y_1-Z-Y_2$ , яка складається з двох каналів регулювання  $K_1$  та  $K_2$ , зображено на рис. 1.

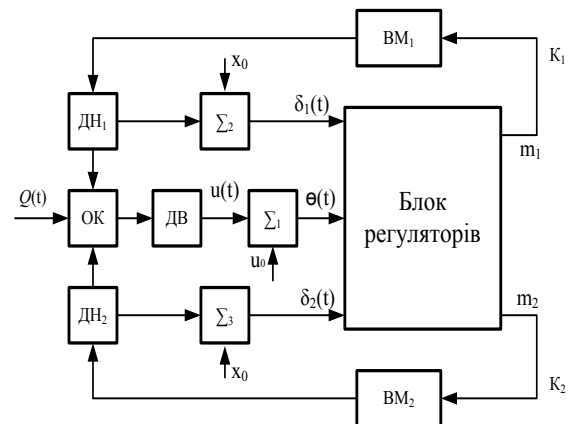


Рис. 1. Структурна схема системи автоматичного регулювання положення антенної щогли

Під час вертикального підйому в результаті дії динамічного вітрового навантаження  $Q(t)$  антенна

щогла відхиляється від вертикального положення в площині виконавчих механізмів  $BM_1$ – $BM_2$ . При цьому динамічне навантаження здійснюється на один з виконавчих механізмів (з навітряної сторони), наприклад  $BM_1$ .

Датчик вертикальності (ДВ) реєструє просторове положення верхівки антенної щогли в даній площині. Сигнал з ДВ подається на вхід суматора  $\Sigma_1$ , де порівнюється з опорним сигналом  $u_0$ . У випадку навантаженого режиму роботи виконавчий механізм  $BM_1$  буде визначати просторове положення антенної щогли в площині  $Y_1$ – $Z$ – $Y_2$ . Похибка просторового положення  $\theta(t)$  антенної щогли характеризується двома основними складовими:

$$\theta(t) = \theta_{\omega}(t) + \theta_Q(t), \quad (1)$$

де  $\theta_{\omega}(t)$  – похибка просторового положення, що викликана невідповідністю швидкості обертання двигуна  $\omega_1$  виконавчого механізму  $BM_1$  швидкості підйому (висунення) антенної щогли –  $V(l)$ ;  $\theta_Q(t)$  – похибка просторового положення, що викликана зміною швидкості обертання  $\omega_1$  двигуна виконавчого механізму  $BM_1$  під дією динамічного вітрового навантаження  $Q(t)$ .

Завданням регулятора в навантаженому каналі регулювання є компенсація похибки просторового положення антенної щогли  $\theta(t)$ . Завданням регулятора в ненавантаженому каналі регулювання є забезпечення встановленого натягнення тросу вимірюваного датчиком натягнення тросу ДН<sub>2</sub>.

Модель антенної щогли під дією вітрового навантаження можна виразити диференціальним рівнянням:

$$p(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( P(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) = f(x, t), \quad (2)$$

де  $p(x)$  – погонна маса щогли;  $EI(x)$  – згинна жорсткість щогли;  $P(x)$  – поздовжня стискаюча сила;  $f(x, t)$  – поперечне розподілене навантаження;  $\alpha$  – узагальнений коефіцієнт енергії, виражений еквівалентом зовнішнього впливу.

Розподілена вага  $p(x)$  та жорсткість  $EI(x)$  для щогли ступінчастої конструкції в межах кожної ділянки є сталими величинами, що полегшує подальше дослідження.

Розподілене поперечне навантаження, обумовлене дією вітру та пружними реакціями тросів виразимо так:

$$f(x, t) = f_0(x, t) - (T_1 + T_2) \delta(x - l) + Q(t) \delta(x - l_0), \quad (3)$$

де  $l$  – Лагранжева координата верхнього кінця щогли;  $l_0$  – Лагранжева координата зосередженого вітрового навантаження на антенний пристрій;  $T_1, T_2$  – сумарні натяги тросів;  $f_0(x, t)$  – поперечне розподілене навантаження на щоглу.

Розв'язок рівняння (2) знайдено методом Гальоркіна, в результаті отримано функціонал:

$$\int_0^1 [p(x)X(x)y'' + \alpha y'X(x) + EIX^{IV}(x)y(t) + (P(x)X'(x))'y(t) - f(x, t)]X(x)dx = 0. \quad (4)$$

Обчислюючи значення інтегралів у (4):

$$a = \int_0^1 X^2(x)p(x)dx; \quad b = \int_0^1 \alpha(x)X^2(x)dx;$$

$$c_1 = \int_0^1 EIX^{IV}(x)X(x)dx;$$

$$c_2 = \int_0^1 (P(x)X'(x))'X(x)dx; \quad (5)$$

$$r(t) = \int_0^1 f(x, t)X(x)dx,$$

отримано диференціальне рівняння поперечних коливань щогли:

$$ay''(t) + by'(t) + cy(t) = r(t). \quad (6)$$

На основі диференціального рівняння поперечних коливань антенної щогли розроблено передаточну функцію антенної щогли:

$$G(s) = k [as^2 + bs + c]^{-1}, \quad (7)$$

де  $a, b, c$  – коефіцієнти диференціального рівняння коливань антенної щогли.

Було обчислено значення коефіцієнтів  $a, b, c$  передаточної функції для відомої антенної щогли в кожній точці висоти її підйому. Запропоновано моделі впливу вітрового навантаження на антенну щоглу під час вертикального підйому та моделі виконавчих механізмів. Як модель вітрового навантаження вибрано два основні типи впливу:

а) пульсаційне вітрове навантаження – вплив у вигляді суми постійної складової та гармонічного сигналу:

$$Q(t) = Q_n + Q^*(t),$$

де  $Q^*(t) = k^* \sin \omega t$ , що характеризується коефіцієнтом пульсацій  $k^*$  вітрового навантаження і частотою пульсацій  $\omega$ ;

б) поривчасте вітрове навантаження – вплив у вигляді суми постійної складової  $Q_n$  та імпульсів поривів з амплітудою  $Q_{пор}$ , тривалістю  $\tau_1$  та проміжками появи  $\tau_2$ :

$$Q(t) = Q_n + Q^{пор}(t).$$

Критерієм якості  $J$  в системі автоматичного управління вибрана мінімальна похибка в сталому режимі, за умови, що швидкодія системи не гірша заданої

$$J = \theta_{\min} \Rightarrow \left| t_{уст} \leq t_{зад} \right. \quad (8)$$

Використовуючи моделі антенної щогли, виконавчого механізму та вітрового навантаження в інтерактивній системі MATLAB, запропоновано мо-

дель системи автоматичного управління підйомом антенної щогли в умовах вітрових навантажень в одній з вертикальних площин (рис. 2).

Дана модель складається з наступних блоків: блок імітації вітрового навантаження (Wind), блок імітації зміни швидкості виконавчих механізмів  $VM_1$ – $VM_2$  (Speed), блоки регуляторів (Controller1,

Controller2), блоки виконавчих механізмів ( $Vm1$ ,  $Vm2$ ), датчик вертикальності щогли ( $Dv$ ), датчик натягу троса ( $Dn2$ ) і блок об'єкта управління – антенна щогла ( $Mast$ ).

Коливальний характер антенної щогли, як об'єкта управління (блок  $Mast$ ), задано передаточною функцією (7).

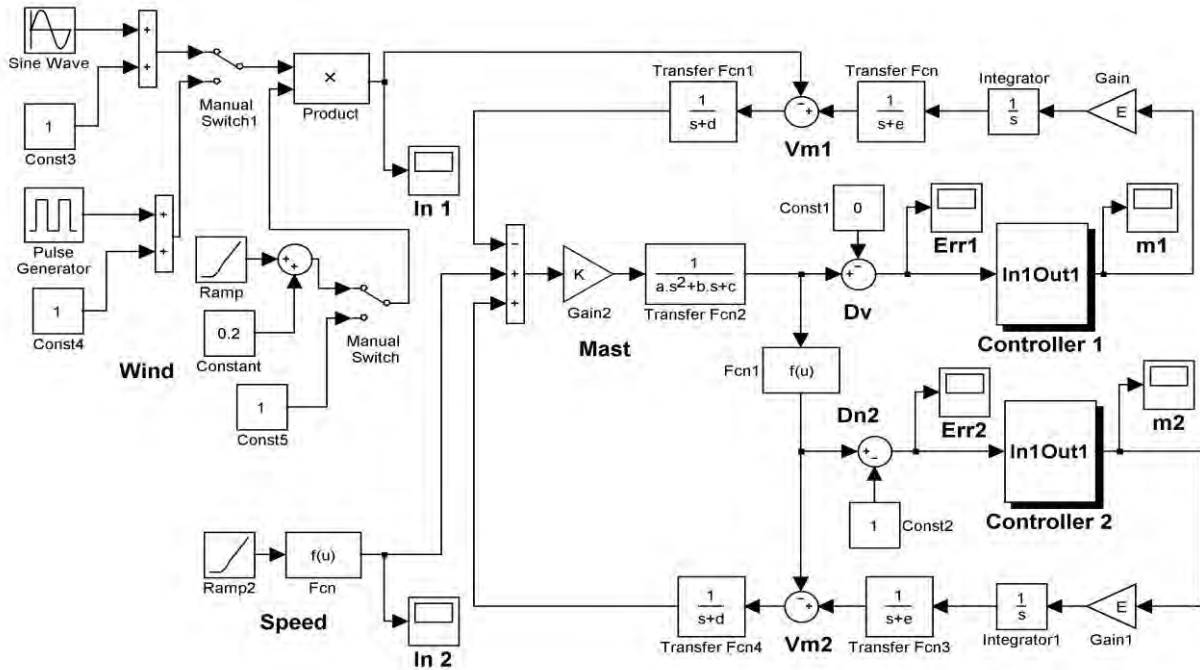


Рис. 2. Модель системи автоматичного регулювання підйомом антенної щогли в одній з вертикальних площин

Блоки виконавчих механізмів  $Vm1$  та  $Vm2$  (електричний двигун постійного струму) задано передаточною функцією

$$G(s) = \varepsilon[s(s + d)(s + e)]^{-1}.$$

Вхідними для нечіткого регулятора є три лінгвістичні змінні – похибка системи  $\theta$ , швидкість зміни (перша похідна) похибки  $\dot{\theta}$ , прискорення (друга похідна) похибки  $\ddot{\theta}$ , які характеризуються двома терм-множинами (лінгвістичними величинами): негативна – 1, позитивна – 2. Вихідною змінною є керуючий вплив на об'єкт –  $m$ . Терм-множини описуються на універсальній множині  $U$  відповідно двома функціями приналежності (ФП):  $\mu^1(u)$  та  $\mu^2(u)$ , що визначає ступінь приналежності кожного елемента  $u$  множині  $U$  числом між 0 і 1.

Функції  $\mu^1(u)$  та  $\mu^2(u)$  вибрані симетричними одна відносно одної з точкою перетину в значенні  $u = 0,5$ . Крім того, функція  $\mu^1(u)$  повинна бути спадаючою, а  $\mu^2(u)$  – зростаючою. Діапазони зміни вхідних та вихідного сигналів (параметри нечіткого регулятора) прийняті симетричними:

$$\begin{aligned} A = \theta_{\max} = -\theta_{\min}; \quad B = \dot{\theta}_{\max} = -\dot{\theta}_{\min}; \\ C = \ddot{\theta}_{\max} = -\ddot{\theta}_{\min}; \quad D = m_{\max} = -m_{\min}. \end{aligned}$$

На універсальній множині  $U=[0,1]$  задаються дві нечіткі множини, які описуються експоненціальними функціями приналежності

$$\mu^1(u; c) = \exp(-cu), \quad u \in [0,1];$$

$$\mu^2(u; c) = \exp[-c(1-u)], \quad u \in [0,1],$$

де  $c$  – коефіцієнт концентрації ФП.

При надходженні на нечіткий регулятор з кроком квантування  $h$  значень вхідних змінних  $\theta$ ,  $\dot{\theta}$  та  $\ddot{\theta}$  здійснюється визначення величин:

$$u_1^* = (\theta^* - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} - \theta_{\min});$$

$$u_2^* = (\dot{\theta}^* - \dot{\theta}_{\min}) / (\dot{\theta}_{\max} - \dot{\theta}_{\min});$$

$$u_3^* = (\ddot{\theta}^* - \ddot{\theta}_{\min}) / (\ddot{\theta}_{\max} - \ddot{\theta}_{\min}).$$

Лінгвістичне правило управління нечіткого регулятора має вигляд:

$$\text{Якщо } (\theta^* = a_1^j) \text{ і } (\dot{\theta}^* = a_2^j) \text{ і } (\ddot{\theta}^* = a_3^j), \text{ то } (m^* = a_4^j), \quad j = \overline{1,2},$$

де  $a_1^j$ ,  $a_2^j$  і  $a_3^j$  – лінгвістичні оцінки похибки, першої та другої похідної похибки, розглянуті як нечіткі множини, визначені на універсальній множині  $U, j = \overline{1,2}$ ;  $a_4^j$  – лінгвістична оцінка керуючого впливу на об'єкт, обрана з терм-множин змінної  $m$ . Лінгвістичні оцінки вибираються з терм-множин

лінгвістичних змінних  $\theta^*$ ,  $\dot{\theta}^*$ ,  $\ddot{\theta}^*$  і  $m^*$ :  $a_i^j \in \{ \text{негативний (1), позитивний (2)} \}$ .

Для визначення конкретного значення керуючого впливу формується результуюча ФП. Проводиться пошук абсциси результуючої фігури  $u_4$  методом «центра тяжіння». Одержане значення  $u_4$  перетворюється в значення керуючого впливу на об'єкт управління

$$m^* = m_{\min} + (m_{\max} - m_{\min})u_4^* \quad (9)$$

$\mu^j(x_i)$  – функція приналежності параметра  $x_i \in [x_{ni}, x_{bi}]$  нечіткому терму  $a_i^j$ ,  $i = \overline{1,3}$ ;  $j = \overline{1,2}$ .

Тоді  $\mu^{mj}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$  – залежна від трьох змінних ( $x_1 \equiv \theta$ ;  $x_2 \equiv \dot{\theta}$ ;  $x_3 \equiv \ddot{\theta}$ ) функція приналежності вектора параметрів обраному керуючому впливу на об'єкт  $m_j$ ,  $j = \overline{1,2}$ , що визначається із системи нечітких логічних рівнянь:

$$\mu^{mj}(x_1, x_2, x_3) = \mu^j(x_1) \wedge \mu^j(x_2) \wedge \mu^j(x_3).$$

Результуюча функція приналежності для керуючого впливу відповідно до робочого правила НР:

$$\mu^m(x_1, x_2, x_3) = \mu^{m1}(x_1, x_2, x_3) \vee \mu^{m2}(x_1, x_2, x_3),$$

де  $\wedge$  – логічне і;  $\vee$  – логічне або.

Проведено математичне моделювання роботи системи автоматичного регулювання положення антенної щогли з двома типами цифрових регуляторів – ПІД-регулятором та нечітким регулятором. Встановлено, що нечіткий регулятор забезпечує на 16% меншу похибку в сталому режимі в широкому діапазоні зміни параметрів динамічних вітрових навантажень для фіксованих значень параметрів передавальної функції антенної щогли.

Проведено моделювання роботи САК підйомом антенної щогли з синтезованим нечітким регулятором для різних точок висоти підйому антенної щогли. За результатами моделювання встановлено, що при зміні параметрів передаточної функції антенної щогли для забезпечення оптимальної якості управління необхідно для кожної точки підйому забезпечити параметри оптимальної настройки нечіткого регулятора.

За результатами дослідження розроблено модель нечіткого регулятора в системі MATLAB, що перестроюється залежно від зміни параметрів нестационарного об'єкта управління (рис. 3). Основною його відмінністю від існуючих є те, що параметри настройки A, B, C, D вводяться в НР з блока Optimal в залежності від зміни в часі параметрів об'єкта управління.

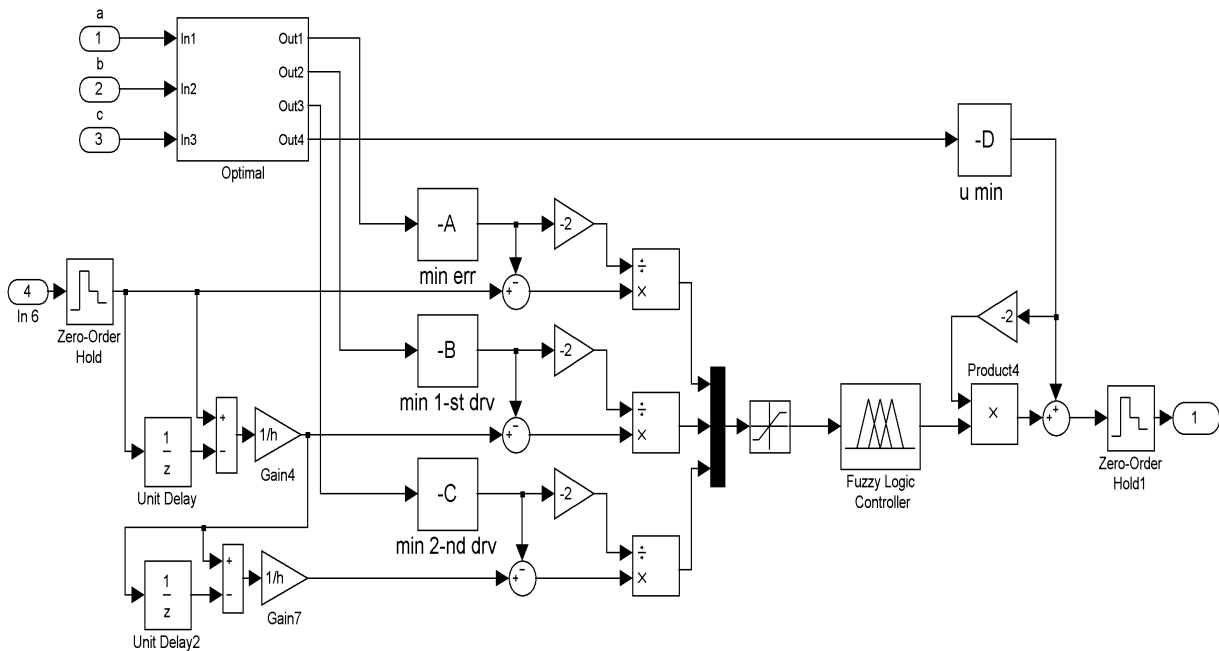


Рис. 3. Модель нечіткого регулятора з блоком Optimal

Під час моделювання роботи САУ з НР встановлено:

а) похибка в системі автоматичного управління прямо пропорційна величині динамічної складової вітрового навантаження; при цьому тривалість перехідного процесу залишається незмінною для всього діапазону значень величини динамічної складової вітрового навантаження;

б) залежність часу встановлення мінімальної похибки в САУ від величини постійної складової

вітрового навантаження характеризується логарифмічною залежністю і не залежить від величини динамічної складової вітрового навантаження;

в) значення критичних частот вітрового навантаження під час піднімання антенної щогли; на цих частотах похибка в системі автоматичного управління різко зростає, при цьому для деяких висот підйому  $l_n$  і  $l_m$  існує по два екстремуми, що свідчить про існування кількох критичних частот;

г) залежність похибки в системі автоматичного

управління від типів та форми ФП, що використовуються в нечіткому регуляторі. На рис. 4 наведено криві залежності сталої похибки в САУ від типів функцій приналежності та значень коефіцієнта концентрації  $c$  (для трикутних та експоненціальних ФП) і  $c'$  (для дзвіноподібних та гаусових ФП).

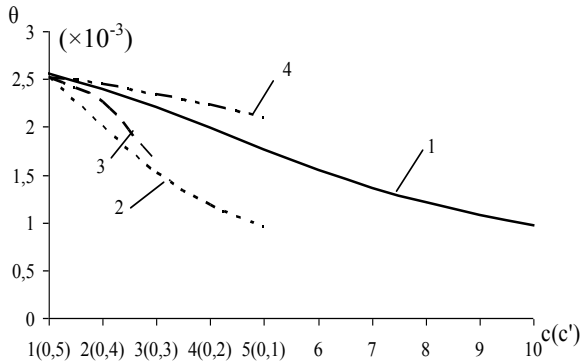


Рис. 4. Залежність похибки в САУ від значень коефіцієнта концентрації  $c$  ( $c'$ ) та типів ФП, які використовуються в НР:

- 1 – для трикутних; 2 – для експоненціальних;  
3 – для гаусових; 4 – для дзвіноподібних

Найменші значення похибки в САУ спостерігаються при використанні трикутних і експоненціальних функцій приналежності. Тому для такого класу САУ в нечітких регуляторах більш доцільно використання цих функцій приналежності.

## Висновки

У результаті імітаційного моделювання визначено, що нечіткий регулятор, який перестроюється при підйомі антенної щогли, дозволяє на 14 – 16% підвищити динамічну точність САУ в порівнянні з регулятором оптимально настроєним на значення параметрів об'єкта управління, які відповідають максимальній висоті, або в 6 – 8 разів знизити час встановлення мінімальної похибки в САУ в порівнянні з регулятором оптимально настроєним на значення параметрів об'єкта управління, які відповідають мінімальної висоті.

## МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДЪЕМОМ АНТЕННОЙ МАЧТЫ В УСЛОВИЯХ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК

Д.В. Кирьянов

Разработана и исследована методом математического моделирования модель системы автоматического управления (САУ) подъёмом антенной мачты на основе нечеткого регулятора в условиях динамических ветровых нагрузок. Исследованы зависимости качества работы САУ от разных типов ветровой нагрузки и изменения параметров антенной мачты.

**Ключевые слова:** антенная мачта, система автоматического управления, цифровой нечеткий регулятор, качество управления, математическая модель, моделирование.

## MODEL OF SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF LIFTING OF AN ANTENNA MAST IN THE CONDITIONS OF WIND LOADINGS

D.V. Kiryanov

The model of system of automatic control (SAC) lifting of an antenna mast on the basis of fuzzy controller in the conditions of dynamic wind loadings is developed and investigated by a method of mathematical modelling. Dependences of quality of work SAC on different types of wind loading and change of parameters of an antenna mast are investigated.

**Keywords:** aerial mast, automatic control system, digital fuzzy controller, quality of control, synthesis, mathematical model, design.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості синтезу ефективних систем автоматичного управління підйомом антенних щогл в умовах збурюючих впливів та забезпеченні можливості скорочення часу розгортання рухомих засобів радіорелейного зв'язку військового призначення.

Кількісна оцінка ефективності використання запропонованої моделі системи автоматичного управління свідчить, що її впровадження дозволить скоротити витрати часу для піднімання антенних щогл до 50% у порівнянні з існуючими системами. Оцінка ефективності моделі нечіткого регулятора показує, що її впровадження дозволить досягти підвищення точності в системі автоматичного керування.

## Список літератури

1. Пичугин С.Ф. Ветровая нагрузка на строительные конструкции / С.Ф. Пичугин, А.В. Махинько. – Полтава: изд. «АСМИ», 2005. – 342 с.

2. Гостев В.И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / В.И. Гостев. – К.: Радиоаматор, 2005. – 708 с.

3. Кір'янов Д.В. Модель САУ для підйому антенної щогли в умовах вітрових навантажень на основі нечіткого регулятора / Д.В. Кір'янов // *Радіоелектронні та комп'ютерні системи*. – Х.: «ХАИ», 2006. – Вип. 7(19). – С. 40-43.

4. Кирьянов Д.В. Методика параметрического синтеза цифрового нечеткого регулятора САУ нестационарными объектами управления / Д.В. Кир'янов // *Системы обработки информации*. – Х.: ХУПС, 2006. – Вип. 5(54). – С. 53-57.

5. Горошко О.О. Стійкість та коливання антенної щогли під дією вітрових навантажень / О.О. Горошко, Д.В. Кір'янов // *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*. – К.: КНУ, 2006. – Вип. №2. – С. 65-69.

6. Кір'янов Д.В. Модель цифрового нечіткого регулятора САУ нестационарними об'єктами управління / Д.В. Кір'янов // *Системы обработки информации*. – Х.: ХУПС, 2006. – Вип. 6(55). – С. 106-110.

Надійшла до редколегії 4.11.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., Р.Г. Савенко, Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, Полтава.